QTris

QTris

QTris e Meccanica Quantistica

Alioscia Hamma
Immacolata De Simone, Michela Nazzaro, Michele Viscardi

2024

Riconoscimenti e Informazioni Generali

Ideatore:

Alioscia Hamma

Team Creativo:

Immacolata De Simone

Michela Nazzaro

Michele Viscardi

Illustrazioni:

Michele Viscardi

Produzione regolamento:

AH QUANTUM LAB

Produzione scatola di gioco:

COMMUNIKART
grafica - stampa

Speciali Ringraziamenti:

Elisabetta Paladino, Università degli Studi di Catania

Edizione:
Edizione *online* per il sito di NQSTI

Playtesters:
Halima Giovanna Ahmad, Maria Bondani, Lorenzo Campos Venuti, Sergio Caprara, Simone Cepollaro, Fabio Chiarello, Gianluca Cuffaro, Stefano Cusumano, Maurizio Dabbicco, Pegah Darvehi, Gianluca Esposito, Giovanni Gramegna, Daniele Iannotti, Barbara Jasser, Lorenzo Leone, Giorgio Lo Giudice, Cosmo Lupo, Maria Maffei, Massimiliano Malgieri, Irene Marzoli, Pasquale Mastrovito, Federica Nablo, Jovan Odavić, Salvatore Oliviero, Elisabetta Paladino, Nitica Sakharwade, Diana Tartaglia, Emanuele Tirrito

Indice

1 Introduzione **7**
- 1.1 Come usare questo libro 7
- 1.2 Filosofia del gioco 7
- 1.3 Come usare questo materiale 9
  - 1.3.1 Obbiettivi didattici 10
- 1.4 Struttura del gioco 11
- 1.5 Struttura della meccanica quantistica 11

2 Il Gioco **13**
- 2.1 Numero dei giocatori 13
- 2.2 Componenti del gioco 13
  - 2.2.1 Griglia di gioco 14
  - 2.2.2 Le tessere di gioco 14
  - 2.2.3 Le Carte mossa 17
- 2.3 Regole del gioco 19
  - 2.3.1 Preparazione del gioco 22
  - 2.3.2 Fase delle operazioni 24
  - 2.3.3 Fase di misura 25
  - 2.3.4 Assegnazione dei punteggi 26
- 2.4 Tattiche di gioco e esempi 33
  - 2.4.1 Come usare la carta H 33
  - 2.4.2 Come usare la carta C_X 34
- 2.5 Altri giochi in cui QTris mostra la meccanica quantistica 37
- 2.6 Regolamento avanzato 40
  - 2.6.1 Tutti contro Eve 40
- 2.7 E ora? 42

Capitolo 1

Introduzione

Benvenuti in QTris, il primo gioco da tavolo concepito per far imparare ai giocatori i concetti fondamentali della meccanica quantistica!

1.1 Come usare questo libro

Questo materiale contiene la prima parte di un libro che è stato realizzato in due parti. Nel materiale che state leggendo troverete la parte che descrive le regole del gioco di QTris. Questo è un gioco educativo che serve a insegnare le regole fondamentali della meccanica quantistica e il loro utilizzo. Giocando a QTris, si impara effettivamente la meccanica quantistica.

La seconda parte del libro sarà pubblicata in sede diversa e prende le mosse dal gioco per introdurre la struttura formale della meccanica quantistica in modo da imparare a fare calcoli e previsioni. Per farlo, sono richiesti strumenti matematici che fanno spesso parte del curriculum del Liceo Scientifico. Questi strumenti vengono introdotti e spiegati nel capitolo 3. Successivamente, nel capitolo 4 si spiega la meccanica quantistica vera e propria usando QTris in molti esempi.

Nel materiale che segue si fa a volte riferimento alla seconda parte del libro, ma la prima parte, cioè questo capitolo e il successivo, possono essere usate da sole in maniera autoconsistente.

1.2 Filosofia del gioco

Perché un gioco per imparare la Meccanica Quantistica? La risposta semplice con la quale potremmo andare avanti è: perché così si avvicinano i giovani studenti a una disciplina così difficile come quella della meccanica quantistica in maniera divertente. Ora, gli autori di questo gioco non condividono molto questa visione educativa. Un po' perché avvicinare qualcuno a qualcosa che

non gli piace con una diversione non è una buona pratica pedagogica. Ma soprattutto perché alcune delle premesse sono completamente false. Gli autori pensano che il gioco[1] sia in realtà una cosa seria e difficile e quindi è lo strumento necessario per imparare una materia seria e difficile come la meccanica quantistica.

Una delle difficoltà nell'insegnamento della Meccanica Quantistica risiede nel fatto che le sue regole sono chiare finché sono astratte si intorbidiscono quando uno cerca di rendere la teoria più concreta. Da un lato, la richiesta di concretezza è la richiesta di sapere in che modo queste regole funzionino e come si connettano ai fatti dell'esperienza. Queste richieste sono assolutamente necessarie quando ci si prova a capire la Natura. Dall'altro lato, la richiesta di concretezza riflette lo spirito dei tempi che si oppone all'astrazione per pura ostilità verso di essa. Poiché l'astrazione è difficile, valutazioni e metriche di apprendimento nelle scuole di vario ordine ne risentono, quindi uno cerca di sbarazzarsene, dimenticandosi che uno degli scopi dell'educazione è proprio quello di insegnare a trovare strutture nei fatti del mondo, e non solo di collezionarli uno dopo l'altro. In altre parole, uno degli scopi dell'educazione è proprio quello di insegnare ad astrarre.

La ragione per cui le regole della mq diventano ambigue quando si cerca di renderle concrete - o, ancora peggio, di visualizzarle - riguarda il fatto che la mq ci dice che la Natura si comporta in una maniera molto lontana dalle nostre intuizioni e i nostri pregiudizi filosofici, e come capire la mq in termini delle nostre tipiche categorie mentali si annoda insieme con questioni di interpretazione nelle quali si sono perse generazioni di fisici e filosofi della mq. Queste questioni sono così complicate che alcuni le ritengono addirittura irrisolvibili; la maggior parte dei fisici quantistici, tuttavia, si rassegna ad usare le regole astratte. Essi sanno che sono corrette e sanno come usarle correttamente. E grazie a questa applicazione corretta ottengono tutte le previsioni sui dati sperimentali di cui hanno bisogno.

Naturalmente, tutto ciò è impossibile senza anni di addestramento e di esperienza, di prove e riprove per tentativi ed errori, e senza una disciplina acquisita negli anni, in cui ad ogni piè sospinto si cerca di cucire insieme l'uso corretto degli strumenti matematici con l'esperienza in laboratorio. Il lavoro di un fisico è una miscela complessa di fede assoluta nei metodi e di spietato atteggiamento critico.

I problemi esposti qua sopra sono particolarmente veri in mq. Per questo questa materia è difficile e non ci si meraviglia che non venga insegnata ai licei, se non in una maniera molto superficiale. Spiegare la struttura dell'atomo o raccontare che vi siano *quanti* discreti di energia; raccontare qualcosa di una equazione dovuta a Schroedinger, che gli studenti non possono in realtà comprendere per via delle difficoltà matematiche di equazioni alle derivate parziali e a tutta la storia della fisica che vi si insinua; l'uso di metafore per connettere onde fisiche a *onde di probabilità* non conduce lontano né tocca gli aspetti essenziali della meccanica quantistica. La tipica risposta della comuni-

[1] Che altri chiamano Matematica.

tà pedagogica è che si debba solamente esporre gli studenti più giovani a certe idee, magari stimolarne la curiosità, per poi rimandare agli studi universitari la comprensione vera e propria della mq.

Può darsi che queste persone abbiano ragione. Che non vi sia un modo di far capire gli aspetti essenziali della mq al livello di liceo. Se è così, questo piccolo tentativo fallirà nel suo scopo più ambizioso. Eppure, qualcosa ci dice che proprio gli studenti più giovani possano guadagnare moltissimo da una esposizione astratta. Il motivo è che i giovani amano giocare, e il gioco, nella sua natura, è astratto. Le regole di un gioco, prendiamo gli scacchi, o un qualsiasi gioco da tavolo, sono astratte. I giocatori sanno perfettamente che l'interpretazione delle caselle, della tavola di gioco, delle carte, delle pedine e delle mosse, non sono per nulla importanti. Quello che conta è come si debbano muovere nel contesto delle regole di gioco per poter vincere. Quello che conta nel gioco è essere in grado di trovare la strategia vincente, non se la pedina che rappresenta un unicorno sia *davvero* un unicorno. A chi se lo chiedesse, tipicamente un adulto, verrebbe detto che non ha capito l'essenza del gioco, che si è soffermato sun aspetto che può essere carino, ma non è quello che conta. I ragazzi, che prendono il gioco seriamente, lo sanno.

Nel prendere contatto con l'esperienza, QTris e le regole formali della meccanica quantistica mostrano che come minimo queste costituiscono la corretta descrizione del comportamento di certi strumenti quando questi interagiscano con certi sistemi fisici tipicamente microscopici. Questo non significa che qua proponiamo un punto di vista strumentalista. Tutto ciò che intendiamo è che nonostante le cose possano essere molto più complicate, l'esperienza ci ha rivelato una serie di fatti, e che questi fatti siano organizzati molto bene all'interno delle regole della meccanica quantistica. Uno dei vantaggi di aprpendere la meccanica quantistica sotto forma di un gioco, è che questo modo è agnostico rispetto alle interpretazioni della teoria. Anche quando uno voglia intraprendere un percorso di ricerca per comprendere più a fondo la natura del processo di misura, la decoerenza, problemi fondazionali della teoria, la natura delle particelle subnucleari; tutto ciò si può fare con molta più competenza se si è padroneggiato l'apparato formale della teoria quantistica. E questo apparato si può imparare giocando a QTris.

1.3 Come usare questo materiale

Il materiale qua presentato può essere utilizzato in una moltitudine di modi. È fondamentalmente diviso in due parti. Nella prima parte, si impara il gioco. Nella seconda parte, si imparano alcuni strumenti matematici e la struttura formale della meccanica quantistica in maniera rigorosa. Alla fine della seconda parte, si sarà compreso che giocare a QTris è effetivamente fare calcoli in meccanica quantistica, e che fare calcoli in meccanica quantistica corrisponde a fare un certo tipo di giochi in QTris. Nella sua completezza, questo materiale può coprire un intero corso di meccanica quantistica a livello liceale o pre-universitario che può coprire fino a cinquanta ore di lezione, includendo

tempo di gioco e esercizi. Parte di queste ore consistono nell'insegnamento di nozioni matematiche che sono già parte del programma del - come minimo - liceo scientifico. Il materiale è così organizzato, per capitoli e numero di ore di lezione che servono a somministrarlo.

1. Capitolo due: Le regole del gioco
    - Imparare le regole basilari del gioco per poter giocare: 2 ore
    - Nozioni di meccanica quantistica all'interno del gioco: 3 ore
    - Gioco avanzato: 2 ore.
2. Capitolo tre: Matematica
    - Matrici: 4 ore
    - Probabilità: 4 ore
    - Numeri complessi: 6 ore
3. Capitolo quattro: Meccanica quantistica
    - Postulati: 4 ore
    - Stati puri e misti: 2 ore
    - Operazioni: 3 ore
    - Entanglement: 3 ore
    - Evoluzioni quantistiche: 3 ore.

1.3.1 Obbiettivi didattici

Gli obbiettivi didattici di questo materiale vanno suddivisi in due parti. Imparando il gioco, si impara la struttura fondamentale della meccanica quantistica, le nozioni di stato, operazioni quantistiche e misura. Si impara la struttura della meccanica quantistica come teoria probabilistica nonché la differenza tra stati quantistici e distribuzioni di probabilità classiche. Inoltre, si impara cosa sia l'entanglement e la sua differenza con la nozione di semplice correlazione classica. Il raggiungimento di questi obbiettivi consente una comprensione dei concetti fondamentali della meccanica quantistica quanto più priva di ambiguità e di pregiudizi metafisici possibile.

Utilizzando tutto il materiale, ci si propone di insegnare più a fondo l'apparato formale della teoria. Questo consente di fare calcoli, previsioni, e risolvere esercizi. La matematica utilizzata prende spunto da quella che in un modo o nell'altro è già presente nei curricola dei licei Italiani. Gli insegnanti troveranno che possono saltare le parti più difficili, indicate con un * senza compromettere l'utilizzo del materiale successivo.

1.4 Struttura del gioco

!

La struttura di questo gioco è fatta di tre fasi cui ci riferiremo continuamente. La prima fase, detta di *preparazione*, in cui si prepara il tabellone di gioco con dei tasselli disposti in delle caselle; la seconda fase, detta delle *operazioni*, in cui i giocatori giocano delle carte per poter modificare la posizione e il tipo dei tasselli; e la terza fase di risoluzione, in cui si assegnano i punteggi ai giocatori: questa fase verrà detta delle *misure*.

L'obbiettivo del gioco è il medesimo del tris: mettere in fila tre simboli uguali all'interno di una griglia di nove caselle. Il QTris nasconde al suo interno numerose differenze con il tris usuale. Il gioco, ad esempio, inizia preparando la griglia con una tessera per casella, e termina con il lancio di qualche dado e, possibilmente, con più tris in contemporanea sulla griglia di gioco!

Le differenze, però, non si fermano qui. Leggendo il seguente regolamento, imparerete tutte le regole del gioco, e, assieme a queste, le peculiarità della meccanica quantistica. Infatti, possiamo dichiarare senza tema di smentita che non vi è alcuna differenza fondamentale tra QTris e la meccanica quantistica. Tutto ciò che è possibile in meccanica quantistica lo sarà anche in QTris. Tra le altre cose, il gioco contiene un numero notevole di gattini di Schrödinger e gattini entangled. Inoltre, le espansioni del gioco permettono addirittura di eseguire il teletrasporto o di fuggire da un buco nero!

MQ

Note di meccanica quantistica. Le note gialline con a fianco il simbolo MQ come questa spiegano in che modo un certo componente o regola di gioco vadano interpretati in meccanica quantistica. Non è necessario leggerle per imparare a giocare.

In questo gioco, la griglia viene inizialmente preparata ponendo su di essa delle tessere. Alla fine del gioco, nella fase delle misure, ogni tessera avrà una certa probabilità di diventare la tessera che assegna punti a uno o a un altro giocatore. Nella fase di gioco detta delle operazioni, i giocatori potranno giocare delle carte per modificare le tessere sul tabellone in modo da migliorare le proprie probabilità di vittoria al momento della assegnazione dei punteggi.

1.5 Struttura della meccanica quantistica

Come ripeteremo più volte, la struttura della meccanica quantistica è la stessa di QTris. Consiste di tre fasi. La prima fase è quella in cui un esperimento quantistico viene preparato. Questo consiste nell'applicare un certo protocollo a un certo numero di apparati, per esempio far passare degli atomi di argento ad una certa temperatura attraverso un apparato di collimazione che li manda in un fascio ristretto verso un bersaglio. La seconda fase è quella delle operazioni, in cui il sistema quantistico può eventualmente interagire con altre componenti

fisiche, e la terza fase è quella della misura, in cui un apparato di misura viene a contatto col sisteme e al seguito di questa interazione registra un risultato della misura, tipicamente indicato da un numero reale. Il risultato sarà sempre uno dei possibili risultati di quell'esperimento, e quale di questi si verificherà sarà casuale. Le probabilità di tali eventi, tuttavia, sono ben calcolabili. La meccnica quantistica si occupa effettivamente di calcolare le probabilità di ottenere certi risultati in certi esperimenti. Uno sperimentatore che abbia accesso a un numero di operazioni sufficienti tra la preparazione e la misura, può cambiare queste probabilità nella maniera desiderata, proprio come il giocatore di QTris con le carte.

§ **Esempi matematici.** Da un certo punto in poi, svilupperemo la struttura formale della meccanica quantistica. Questa viene espressa in termini di strumenti matematici come matrici, numeri complessi e probabilità. Molti esempi matematici vengono inseriti in riquadri come questo.

Esercizio.

Allo stesso modo, questo tipo di riquadri indica esercizi che il lettore o lo studente siano invitati a risolvere.

Capitolo 2

Il Gioco

2.1 Numero dei giocatori

Il gioco è adatto a $2-9$ giocatori di età dai 12 anni in su. Nella versione base, i due giocatori verranno indicati con Alice e Bob. Alice e Bob possono anche essere giocati ognuno da una squadra che decide insieme le mosse. Nelle versioni avanzate, un terzo giocatore si chiama Eve. Alice e Bob possono cooperare contro Eve o tutti possono giocare contro tutti. Nel caso di tre squadre (Alice, Bob, Eve) di tre persone ciascuno si raggiunge il numero di 9 giocatori.

2.2 Componenti del gioco

Il gioco del QTris è formato dalle seguenti componenti:

- la griglia di gioco;
- tessere circolari: bianche ○, nere ● e bianconere ◑, ◐ (9x);
- tessere triangolari gialle necessarie per descrivere l'entanglement;
- tessere quadrangolari necessarie per descrivere l'azione di alcune carte di gioco;
- un dado ad otto (d8) facce e due dadi a dieci facce (d10): uno usato per le decine e uno per le unità.;
- un mazzo di carte di gioco, che corrispondono alle operazioni quantistiche: I, X, Y, Z, H, U, C_X.

In questa versione di QTris, la griglia, le tessere e le carte sono stampabilii dal materiale pdf allegato alla fine di questo documento. Per i dadi si consigliano di usare quelli tipicamente utilizzati per i giochi di ruolo o una delle varie app che simulano i lanci di dadi su smartphone. Nelle seguenti sottosezioni

Figura 2.1: **Griglia di gioco.**

approfondiremo ciascun componente e la sua rispettiva utilità all'interno del gioco.

2.2.1 Griglia di gioco

La griglia di gioco, rappresentata in Fig. 2.1, è un tabellone composto da nove caselle numerate. Su ogni casella è possibile apporre una tessera di gioco. Le carte si giocano sulle caselle e trasformano le tessere di gioco in altre tessere di gioco.

MQ

Le caselle sono sistemi quantistici. Come prima spiegazione di come la meccanica quantistica sia rappresentata in QTris, parliamo del tabellone di gioco. Il tabellone rappresenta un sistema quantistico composito! Infatti, ogni casella rappresenta un sistema quantistico e quindi l'intera griglia rappresenta un sistema quantistico costituito da nove sottosistemi. Ognuna delle caselle è un tipo di sistema quantistico chiamato *qubit*, che è alla base della computazione quantistica. Un qualsiasi sistema quantistico si può descrivere con un sistema composto da un numero opportuno di qubits. Quindi, il tabellone di QTris rappresenta un sistema quantistico di nove qubits.

2.2.2 Le tessere di gioco

Come accennato in Sez. 2.2.1, su ogni casella della griglia di gioco è possibile apporre una tessera di gioco. Vi sono tre tessere di gioco di singola casella di forma circolare: la bianca, la nera e quella bianconera.

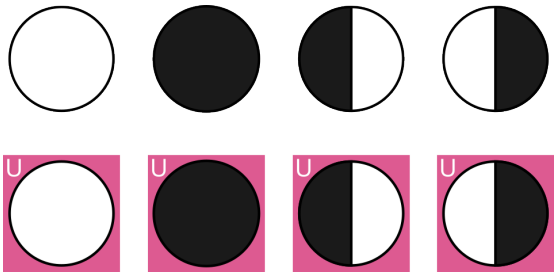


Figura 2.2: **Tessere di singola casella presenti nel gioco.** Ciascuna tessera di singola casella corrisponde ad una tessera di gioco di forma circolare. È possibile decorare una tessera circolare con una tessera quadrata rosa U giocando la rispettiva carta mossa. Il modo in cui è possibile creare stati del genere all'interno del gioco è descritto in Sez. 2.2.3.

In alcuni casi, queste ultime possono essere ruotate, e hanno nel gioco due significati diversi. Spiegheremo meglio questa particolarità nella Nota 2.2.2. Notiamo, inoltre, che in alcuni casi è possibile *decorare* con una tessera quadrata le tessere circolari e triangolari. Con la parola *"decorare"* indicheremo il porre la tessera quadrata sotto la tessera presente sulla casella su cui usiamo la carta. I dettagli sull'effetto delle carte mossa saranno apporfonditi in Sez. 2.2.3.

In Fig. 2.3 è rappresentato un tipico esempio di gioco. Su questa griglia possiamo notare: una tessera bianca ○ sulle caselle $2, 9$; una tessera nera decorata dalla tessera rosa U sulla casella 3; una tessera bianconera orientata a *destra* ◑ sulla casella 8; una tessera nera ● sulle caselle $4, 7$; una tessera bianconera orientata a *sinistra* ◐ e decorata rosa sulla casella 5. Le caselle 1 e 6 sono occupate da quelle che chiamiamo tessere entangled, che andiamo a spiegare[1].

MQ

Gattini di Schrödinger. Le tessere bianconere sono i cosiddetti gattini di Schrödinger. Questi sono gatti il cui colore non è con certezza bianco o con certezza nero. Tuttavia, una volta che il colore del gattino sia stato osservato e si sia visto che sia - per esempio - nero, esso è sicuramente nero (nell'esempio originale di Schrödinger il fisico austriaco più drammaticamente parlava di vivo/morto anziché bianco/nero). Tuttavia, i gattini di Schrödinger non sono semplicemente descritti da delle probabilità; ma questo lo capiremo successivamente nel gioco. Se alla fine di questo regolamento e dopo aver giocato un po' di partite si sarà in grado di capire cosa sono i gattini di Schrödinger, potrete dire di conoscere davvero qualcosa di meccanica quantistica!

[1]Come si può notare in Fig. 2.3, è possibile decorare le tessere triangolari con una tessera rossa H, corrispondente all'aver utilizzato una carta H su una casella su cui era, per l'appunto, apposta una tessera triangolare.

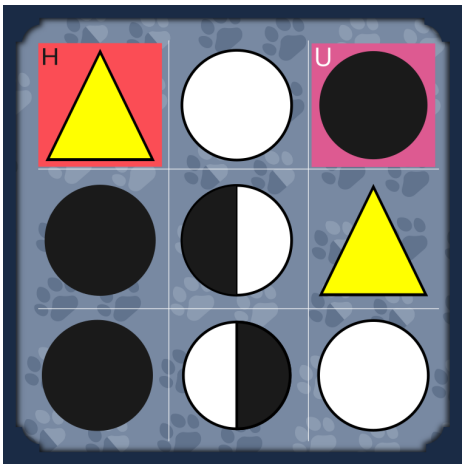


Figura 2.3: **Preparazione del gioco.** Esempio di preparazione della griglia di gioco.

Tessere Entangled

Alcune tessere del gioco possono essere messe in correlazione con tessere di altre caselle utilizzando una particolare carta mossa. In particolare, vedremo che è possibile correlare due tessere circolari poste su due caselle qualsiasi della griglia. Per rappresentare le tessere correlate, utilizzeremo delle tessere di forma triangolare. Nell'esempio in Fig. 2.3, le tessere sulla casella 1 e 6 sono correlate. Infatti, sono stati apposti, sulle due caselle, due triangoli dello stesso colore.

Ogni casella con una tessera senza triangoli viene chiamata *stato di singola casella*. Le caselle con tessere triangolari del medesimo colore vengono chiamate *stati entangled*.

In Fig. 2.2 sono rappresentati tutti gli stati di singola casella presenti nel gioco. Sulla prima riga troviamo, infatti, le tessere circolari. Gli stati corrispondenti decorati con la tessera U sono mostrati nella seconda riga della figura. La rappresentazione di tutti gli stati entangled si trova in Fig. 2.4.

!

L'orientamento delle tessere circolari è molto importante in QTris, ma non per tutte le tessere. Per gli stati di singola casella di colore bianco o nero, l'orientamento non ha nessuna rilevanza; esse si possono disporre come si vuole. Invece, le tessere bianconere (o bianconere decorate) con orientazioni differenti rappresentano stati differenti: l'orientazione rappresenta la loro proprietà fondamentale. Dunque, è importante prestare attenzione all'orientamento delle tessere per capire correttamente l'effetto che le carte mossa o la misura finale possono avere sullo stato.

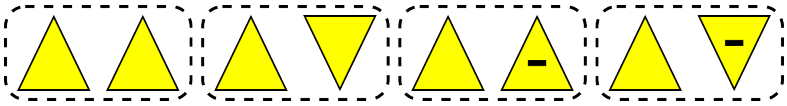


Figura 2.4: **Stati entangled.** Ogni stato entangled è uno stato di due caselle. Su entrambe le caselle di uno stato entangled si pone una tessera triangolare. Le tessere triangolari di uno stato entangled devono essere dello stesso colore. Nota che le caselle di uno stato entangled non devono essere necessariamente vicine. Per esempio, in Fig. 2.3, le caselle 1 e 6 sono coperte da due tessere triangolari dello stesso colore, ad indicare che lo stato di quelle due caselle è *entangled*. L'esempio precedentemente citato ci dice anche che le tessere di stati entagled, così come per le tessere di singola casella, si possono decorare con tessere quadrate; la lista completa di tutte le possibili rappresentazioni di stati entangled presenti nella versione base di QTris è riportata in Fig. **??**.

MQ

Le tessere sono stati quantistici. In meccanica quantistica, ogni sistema fisico può essere descritto da uno *stato*. Lo stato del sistema permette di prevedere le probabilità di tutti i possibili risultati di un esperimento su quel sistema. Avete capito bene: *probabilità*. La Natura infatti determina solo delle probabilità per ciò che può accadere. Tuttavia queste probabilità non sono arbitrarie, ma seguono delle leggi fisiche ben precise. Questo insieme di leggi fisiche costituisce le leggi della meccanica quantistica. Quindi, in QTris, ogni configurazione sul tabellone rappresenta lo stato di un sistema quantistico di nove qubits.

2.2.3 Le Carte mossa

Il gioco è dotato di un mazzo di cinquantadue (52) carte mossa. Ciascuna carta mossa rappresenta un'operazione che è possibile compiere su uno stato del gioco. Le carte mossa, in sostanza, consentono al giocatore di agire su uno stato per modificarlo. Tramite le carte mossa, quindi, il giocatore può modificare la disposizione delle tessere sulla griglia di gioco.

Le carte mossa a disposizione dei giocatori nella versione base di QTris sono: I, X, Y, Z, H, U, C_X.

In questa sezione, illustreremo gli effetti di tutte le carte appena elencate. Le regole che spiegheremo sono applicabili anche nel caso in cui le tessere su cui agiscono sono state decorate con la tessera rosa U o la tessera rossa H.

Carte mossa su singola casella

- La carta I non ha alcun effetto e serve a passare il turno.

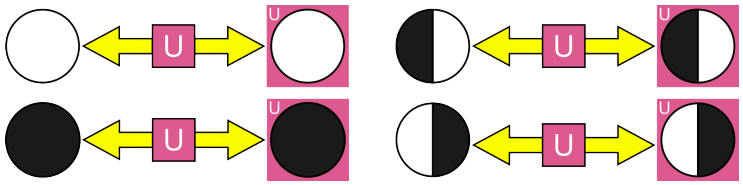


Figura 2.5: **Effetto della carta mossa U sulle tessere di singola casella.** Dopo aver applicato la carta mossa U su una tessera bianca, nera o bianconera, bisogna decorarla inserendovi al di sotto una tessera rosa. Viceversa, applicando nuovamente la carta mossa U, dovremo rimuovere la tessera rosa. Questa regola di decorazione è valida anche quando si usa una carta U su una qualsiasi tessera di uno stato entangled.

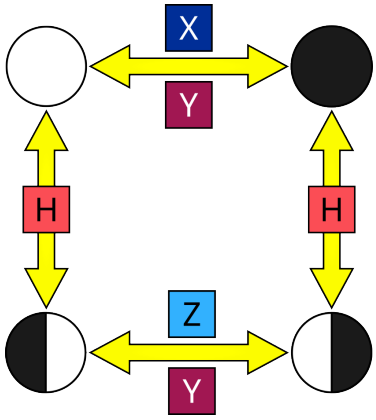


Figura 2.6: **Mappa delle operazioni di singola casella X, Y, Z, H.** Queste regole valgono anche per le tessere decorate dalla tessera rosa U.

- Le carte mossa X, Y, Z, H agiscono su una singola casella, e le regole che determinano la loro azione sono rappresentate graficamente in Fig. 2.6. In particolare, la carta X agisce come un *cambia colore*, la carta Z come un *cambia orientazione* e la carta Y sia come un *cambia colore*, che come un *cambia orientazione*, a seconda dello stato su cui la applichiamo.
- La carta mossa U trasforma una qualsiasi tessera, decorandola con la corrispondente tessera rosa che andrà posta sotto la tessera già presente, come mostrato in Fig. 2.5. L'utilizzo della carta U su una tessera già decorata con una tessera rosa serve per rimuovere la tessera rosa.

Carte mossa su due caselle

L'unica carta mossa che coinvolge due tessere di gioco è la C_X. Essa, infatti, agisce su due caselle e può trasformare coppie di stati di singola casella in stati

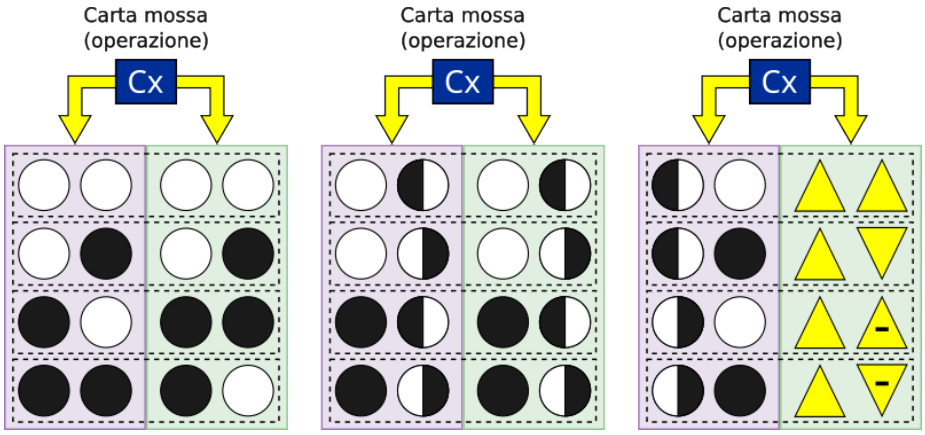


Figura 2.7: **Tabella della carte mossa C_X sugli stati del gioco.** Queste regole valgono anche per gli stati decorati dalla tessera rosa U. Notare che l'ordine delle tessere nella parte sinistra della tabella non è importante. Per esempio, un giocatore, giocando la carta C_X sullo stato entangled tessera bianca (decorata con triangolino)-triangolo alto, può trasformare quello stato in tessera bianco-nera orientata a destra-tessera bianca scegliendo a suo piacere su quale casella piazzare la prima e su quale la seconda tessera.

entangled, e viceversa. Le regole che descrivono l'effetto della carta mossa C_X sono riportate in Fig. 2.7.

Come abbiamo visto, la mossa C_X consente di ottenere stati correlati con tessere triangolari, vale a dire i cosiddetti stati entangled. A questo punto, uno può anche giocare carte di singola casella sugli stati entangled. Il loro effetto è descritto in Fig. 2.8, Fig. 2.9 e Fig. 2.10..

MQ

Le operazioni quantistiche. In meccanica quantistica, gli stati di un sistema possono cambiare col tempo. Tale cambiamento viene detto evoluzione ed è di due tipi che vengono chiamati *operazioni unitarie* e *operazioni non unitarie* a seconda delle leggi che le descrivono. Le carte mossa in QTris descrivono esattamente le leggi delle operazioni unitarie su un sistema quantistico di nove qubits.

2.3 Regole del gioco

Ogni partita si articola in tre fasi: preparazione, in cui viene preparata la griglia di gioco, fase di operazione, in cui i giocatori giocano le loro carte mossa, e fase di misura, in cui vengono assegnati i punteggi ai giocatori con delle probabilità che dipendono dallo stato finale del tabellone. Nelle seguenti sottosezioni sono descritte nel dettaglio tutte le fasi di gioco.

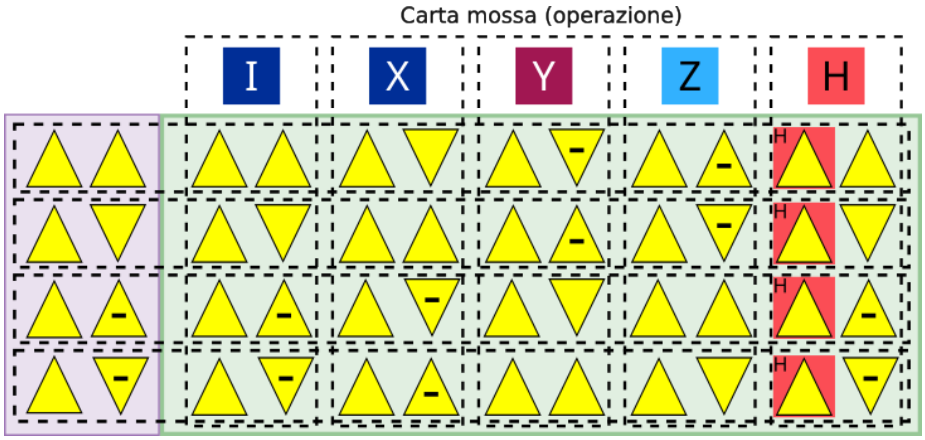


Figura 2.8: **Tabella delle carte mossa sugli stati entangled del gioco.** È importante notare che le carte mossa indicate in tabella consentono di passare dagli stati entangled del riquadro viola di sinistra ai rispettivi stati entangled riportati nella colonna della carta mossa all'interno del riquadro verde di destra. Questa tabella è utilizzabile anche per gli stati entangled decorati dalla tessera rosa U.

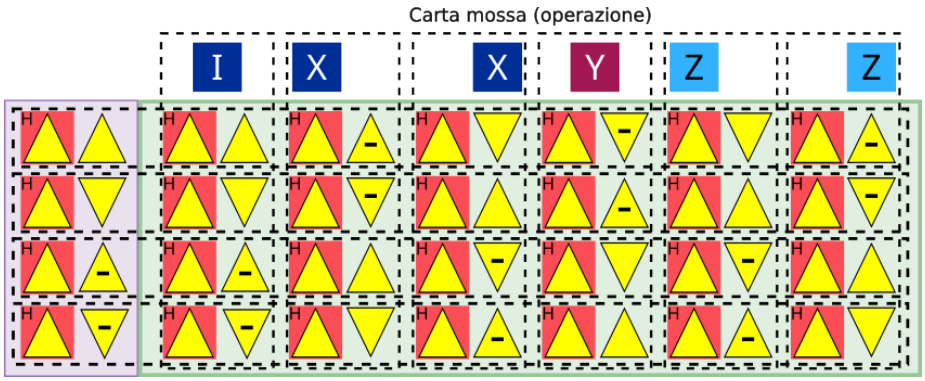


Figura 2.9: **Tabella delle carte mossa sugli stati entangled decorati da H.**

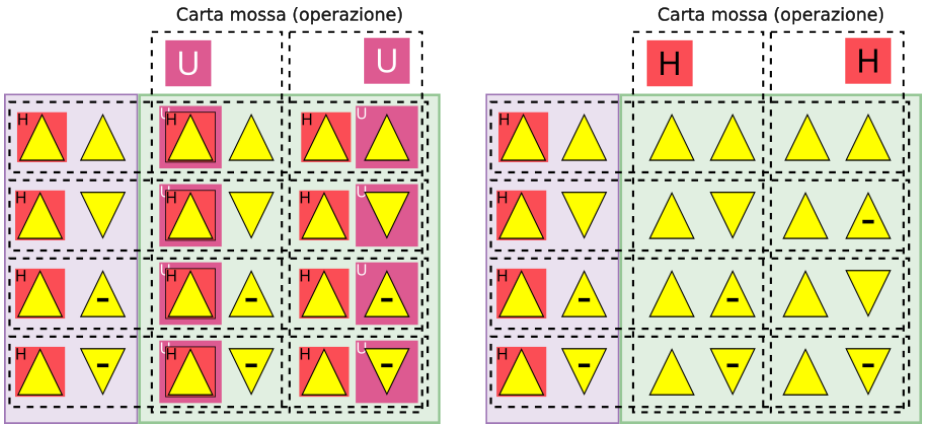


Figura 2.10: **Tabella delle carte mossa sugli stati entangled decorati da H.**

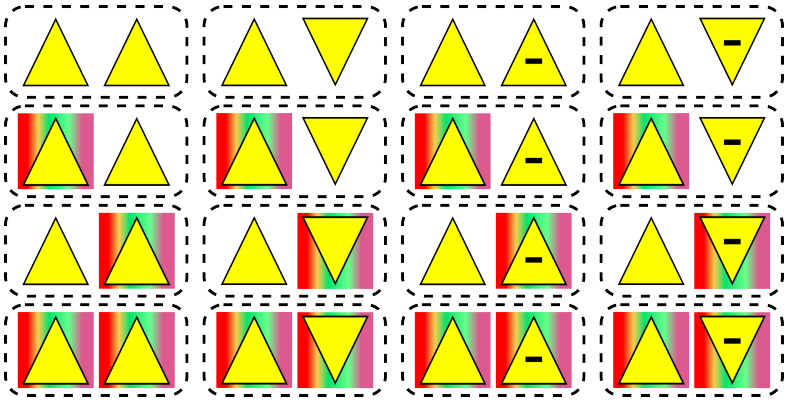


Figura 2.11: **Tabella completa degli stati entangled presenti nel gioco.** Nota bene: le tessere quadrate multicolore non sono presenti nel gioco. Servono solo per indicare che è possibile decorare un qualsiasi stato entangled con una o più tessere quadrate (come si vedrà meglio in seguito).

MQ

La struttura di un esperimento quantistico. In meccanica quantistica, ogni esperimento consiste di tre fasi: *preparazione, operazioni* e *misure*. Nella prima fase si determina quale sia lo stato iniziale del sistema. La seconda fase consiste in come lo stato evolve nel tempo per via delle operazioni dello sperimentatore o delle interazioni fisiche del sistema con altri oggetti fisici, e l'operazione di misura è quella che rivela in laboratorio l'effetto di un esperimento. Ad esempio, se si effettua un esperimento con fotoni sparati verso uno schermo con due fenditure, la preparazione consiste nel modo in cui i fotoni vengono sparati, le operazioni consistono nella interazione dei fotoni con lo schermo e le fenditure, e la misura consiste nel vedere in che punto i fotoni che passano attraverso le fenditure vengono rivelati al di là dello schermo. In QTris, ogni partita rappresenta un esperimento di meccanica quantistica e dunque è costituita da una preparazione, delle operazioni e delle misure.

2.3.1 Preparazione del gioco

La fase di preparazione inizia con il disporre casualmente delle tessere sulla griglia di gioco, in modo tale che ogni casella sia occupata da un'unica tessera.

!

Durante la preparazione, è possibile apporre sulla griglia solo stati validi all'interno del gioco. Dunque, non è possibile porre solo una delle due tessere che compongono un qualsiasi stato entangled.

Si procede, poi, con il costruire il mazzo delle carte mossa. In questo regolamento sono fornite quattro possibili preparazioni del mazzo delle carte mossa, che corrispondono a quattro differenti livelli di difficoltà del gioco. Le preparazioni sono le seguenti: 4 Versione base:

- I: 6 carte
- X: 12 carte
- Y: 6 carte
- Z: 14 carte
- H: 18 carte

Espansione con U:

- I: 5 carte
- X: 10 carte
- Y: 5 carte
- Z: 11 carte

- H: 11 carte
- U: 10 carte

Espansione con C_X:

- I: 5 carte
- X: 10 carte
- Y: 5 carte
- Z: 11 carte
- H: 11 carte
- C_X: 10 carte

Espansione con U e C_X:

- I: 4 carte
- X: 8 carte
- Y: 4 carte
- Z: 9 carte
- H: 9 carte
- U: 9 carte
- C_X: 9 carte

Successivamente, si mescola il mazzo delle carte mossa e se ne distribuiscono sei (6) a ciascun giocatore. I giocatori devono, adesso, stabilire i turni di gioco. Per farlo, entrambi i giocatori dovranno lanciare un dado a otto facce (d8). Il giocatore che ha ottenuto il valore più alto nel lancio del dado giocherà per primo, e gli sarà assegnato il simbolo tessera bianca come proprio simbolo di gioco. Ovvero, dovrà cercare di fare tris utilizzando le tessere bianche. Al secondo giocatore, invece, sarà assegnato il simbolo di gioco tessera nera. Dunque, dovrà cercare di fare tris utilizzando il simbolo tessera nera.

! Gli unici tris validi sono quelli formati da tessere monocolore non decorate.

I giocatori, ora in possesso di sei (6) carte mossa in mano, possono decidere di scartare un numero qualsiasi di carte mossa dalla mano e pescarne altrettante dalla cima del mazzo delle carte mossa. Questa meccanica di gioco si chiama *mulligan*, ed è utile per assicurarsi di avere in mano, all'inizio della partita, le carte mossa adatte alla strategia di gioco che si vuole adottare.

MQ

Gli stati puri in meccanica quantistica. In meccanica quantistica, ogni sistema fisico viene inizialmente preparato in un certo stato seguendo un protocollo sperimentale. Se questo protocollo sperimentale è perfettamente determinato, il sistema fisico verrà preparato in uno stato ben determinato detto *stato puro*. Gli stati descritti finora sono stati puri. Per esempio, quando prepariamo una casella nello stato tessera bianca, sappiamo che quello è lo stato del sistema. Tuttavia, si potrebbe preparare lo stato sapendo che ha un certo colore, ma non si sa quale. In questo caso si dice che si è preparato uno stato *misto*. Notate che questo è l'effetto che si ottiene dopo una misura, che sarà spiegato in maggior dettaglio successivamente. È possibile giocare a QTris con stati misti, ma questo richiede l'espansione *QTris-Exp*.

2.3.2 Fase delle operazioni

La fase delle operazioni inizia subito dopo il termine della fase di preparazione, ed è suddivisa in turni di gioco. La fase delle operazioni consiste sostanzialmente nel giocare le carte mossa, e permette ai giocatori di modificare lo stato del sistema.

La fase delle operazioni è formata da dieci (10) turni di gioco, di cui cinque (5) per ciascun giocatore. Ad ogni turno di gioco, il giocatore che sta giocando dovrà:

1. pescare due (2) carte mossa dal mazzo delle carte mossa;

2. giocare due (2) carte mossa fra quelle nella sua mano.

La fase delle operazioni termina quando entrambi i giocatori hanno giocato cinque (5) turni di gioco.

MQ

Operazioni unitarie. In meccanica quantistica, se un sistema è isolato la sua evoluzione è descritta da operazioni unitarie. Queste descrivono le interazioni fisiche tra parti del sistema. Per esempio, in un esperimento con atomi di argento che vengono collimati in un raggio che passi attraverso i poli di due magneti, il sistema costituito da atomi e magneti viene isolato, e la sua evoluzione viene descritta da operazioni unitarie. Ma cosa sono le operazioni unitarie? Queste sono quelle operazioni per cui si può sempre tornare indietro. Per esempio, se si parte da uno stato quantistico tessera bianconera orientata a destra, l'operazione unitaria H lo trasforma in tessera bianca. Tuttavia, questa operazione è reversibile. Infatti, usando nuovamente H, si torna indietro alla tessera bianconera orientata a destra. Se si guardano tutte le regole di QTris riguardo l'utilizzo delle carte, si scoprirà che non vi sono operazioni unitarie irreversibili. Infatti, questa è la definizione delle operazioni unitarie in meccanica quantistica: le operazioni reversibili. Come vedremo, vi sono altre operazioni im meccanica quantistica che non sono unitarie, cioè non sono reversibili, la più importante delle quali è l'operazione di misura.

2.3.3 Fase di misura

Al termine della fase di operazione, comincia la fase di misura. In questa fase andranno misurati tutti gli stati che non sono composti unicamente da tessere bianche o nere. Alla fine di questa fase, tutte le tessere sul tabellone saranno bianche o nere.

La procedura di misurazione degli stati sulla griglia è riportata nel seguente riquadro.

Misurazione della griglia di gioco.
A partire dalla casella 1, e fino alla 9:

- Controllare il tipo di tessera che è presente sulla casella.

  1. Se è una tessera bianca o nera, passare alla prossima casella.
  2. Se è una tessera bianconera:
     (a) consultare la tabella in Fig. 2.12;
     (b) cercare lo stato che dobbiamo misurare;
     (c) lanciare il dado indicato dalla tabella di misura;
     (d) a seconda del risultato, sostituire la tessera dello stato che abbiamo misurato con la tessera del nuovo stato a valle della misura.
  3. Se la tessera sulla casella è una tessera triangolare, significa che stiamo per misurare uno stato entangled. In questo caso:
     (a) consultare la tabella di misura in Fig. 2.13;
     (b) cercare lo stato entangled che dobbiamo misurare;
     (c) lanciare il dado indicato dalla tabella di misura;
     (d) a seconda del risultato, sostituire le tessere dello stato che abbiamo misurato con le tessere del nuovo stato a valle della misura.

2.3.4 Assegnazione dei punteggi

Al termine della fase di misura, su ogni casella della griglia sarà presente una tessera bianca o nera. A questo punto, è possibile assegnare i punteggi ai giocatori. Per ciascun tris effettuato con il suo simbolo di gioco, il giocatore ottiene un (1) punto.

Vince la partita il giocatore con più punti.

[3] La prima tabella in Fig. 2.14 contiene un'approssimazione delle probabilità di misura dei rispettivi stati. Le probabilità di misura sono qui di seguito riportate in ordine, dall'alto verso il basso, sotto forma di risultato del lancio di un dado ad otto facce (d8): (1, 2-4, 5-7, 8), (1-3, 4, 5, 6-8), (1, 2-4, 5-7, 8), (1-3, 4, 5, 6-8).

[5] La prima tabella in Fig. 2.15 contiene un'approssimazione delle probabilità di misura dei rispettivi stati. Le probabilità di misura sono qui di seguito riportate in ordine, dall'alto verso il basso, sotto forma di risultato del lancio di un dado ad otto facce (d8): (1, 2-4, 5-7, 8), (1-3, 4, 5, 6-8), (1, 2-4, 5-7, 8), (1-3, 4, 5, 6-8).

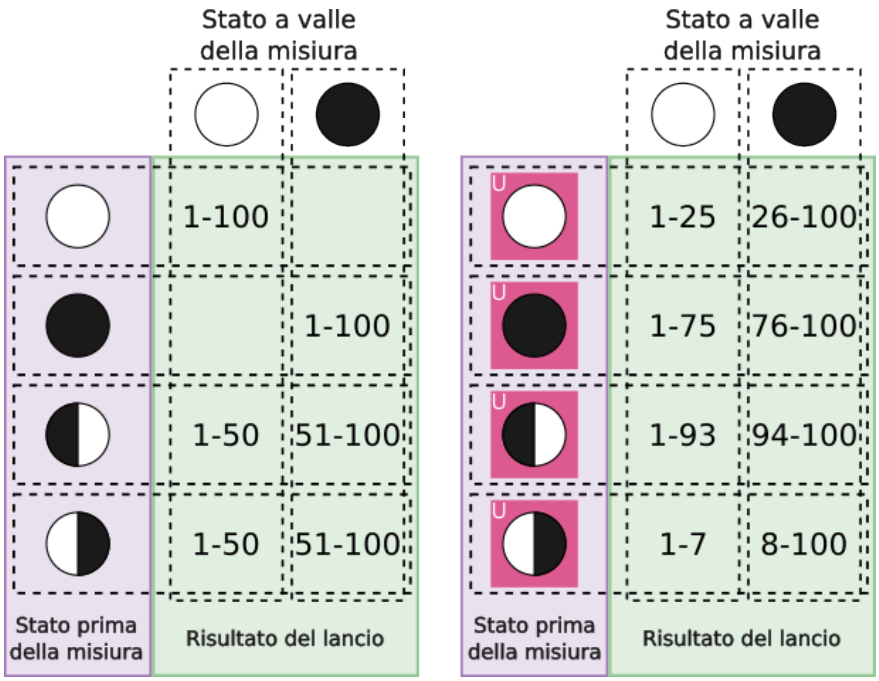


Figura 2.12: **Tabella di misura 1.** Durante una misura sarà necessario lanciare due dadi a dieci facce: uno per le decine e uno per le unità. Il risultato di questi due lanci sarà un numero compreso tra 1 e 100, e dunque un risultato percentuale.

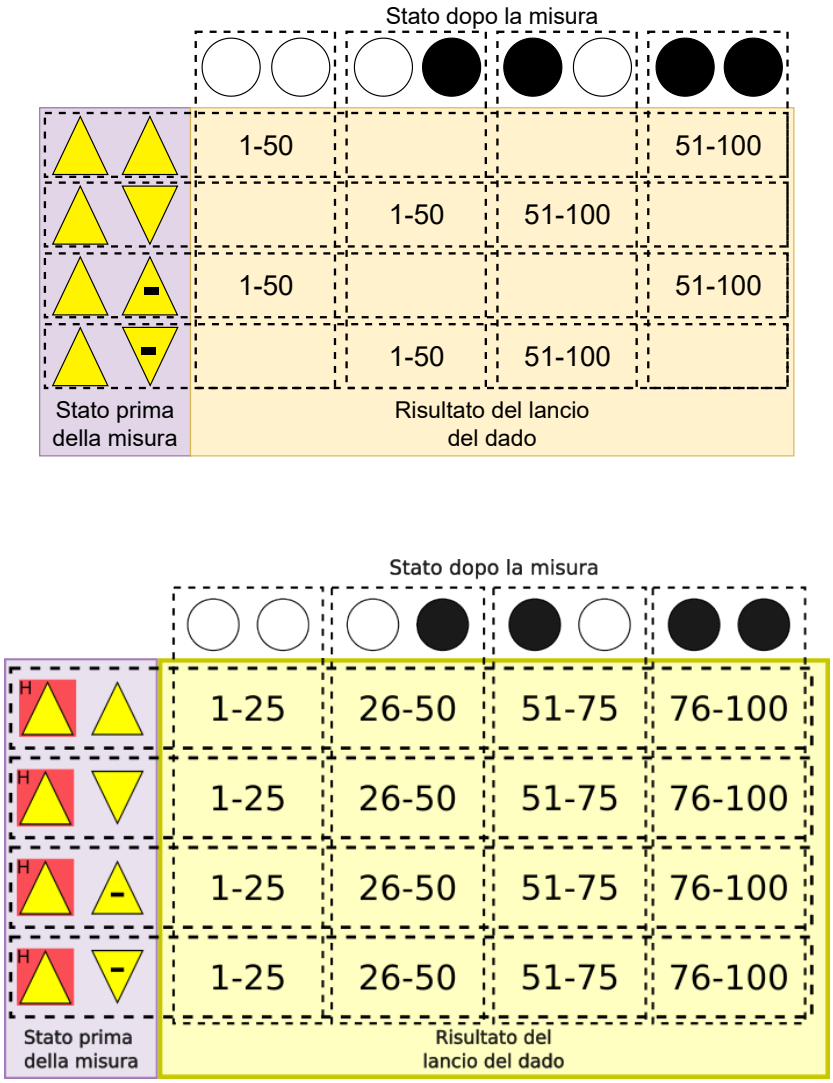


Figura 2.13: **Tabella di misura degli stati entangled.** Gli stati entangled non decorati da tessere rosa forniscono probabilità di misura identiche per qualsiasi stato sia possibile avere, rispettivamente, a valle della loro misura.

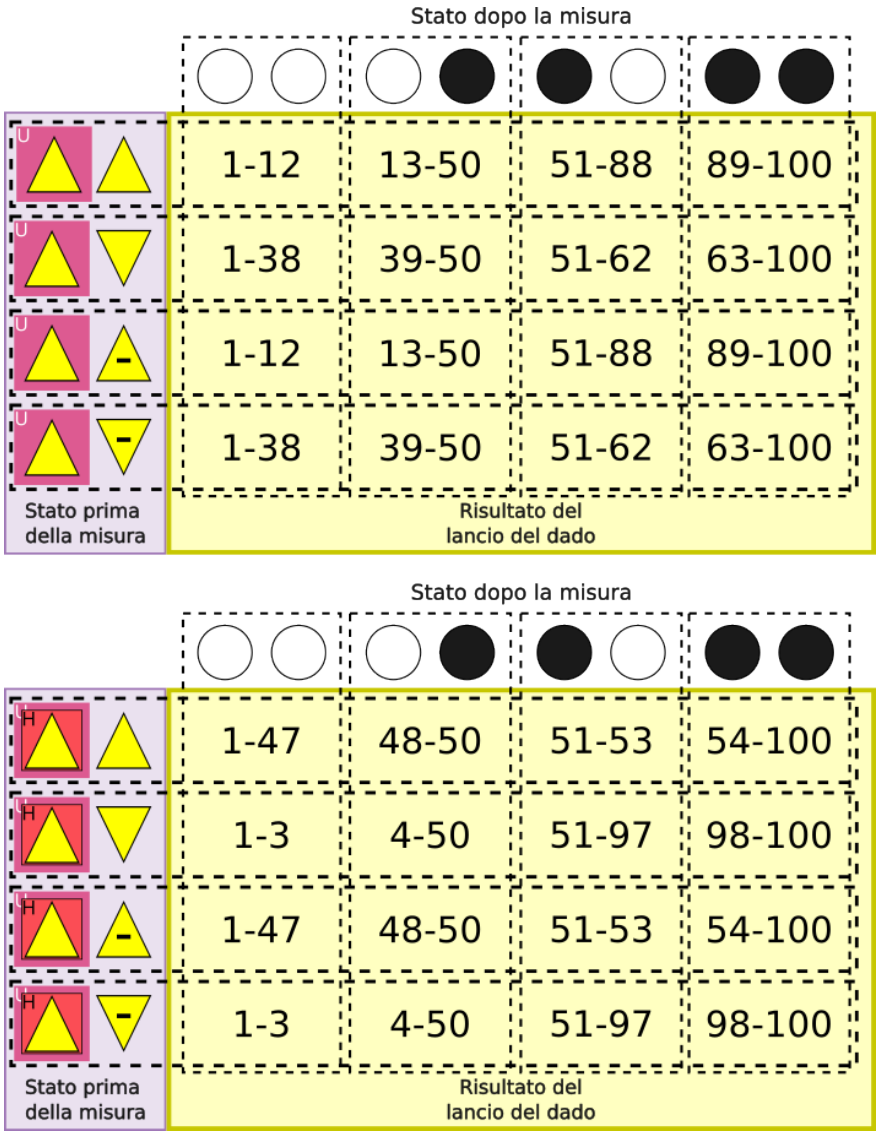


Figura 2.14: **Tabella di misura 3.** Durante una misura sarà necessario lanciare due dadi a dieci facce: uno per le decine e uno per le unità. Il risultato di questi due lanci sarà un numero compreso tra 1 e 100, e dunque un risultato percentuale.[3]

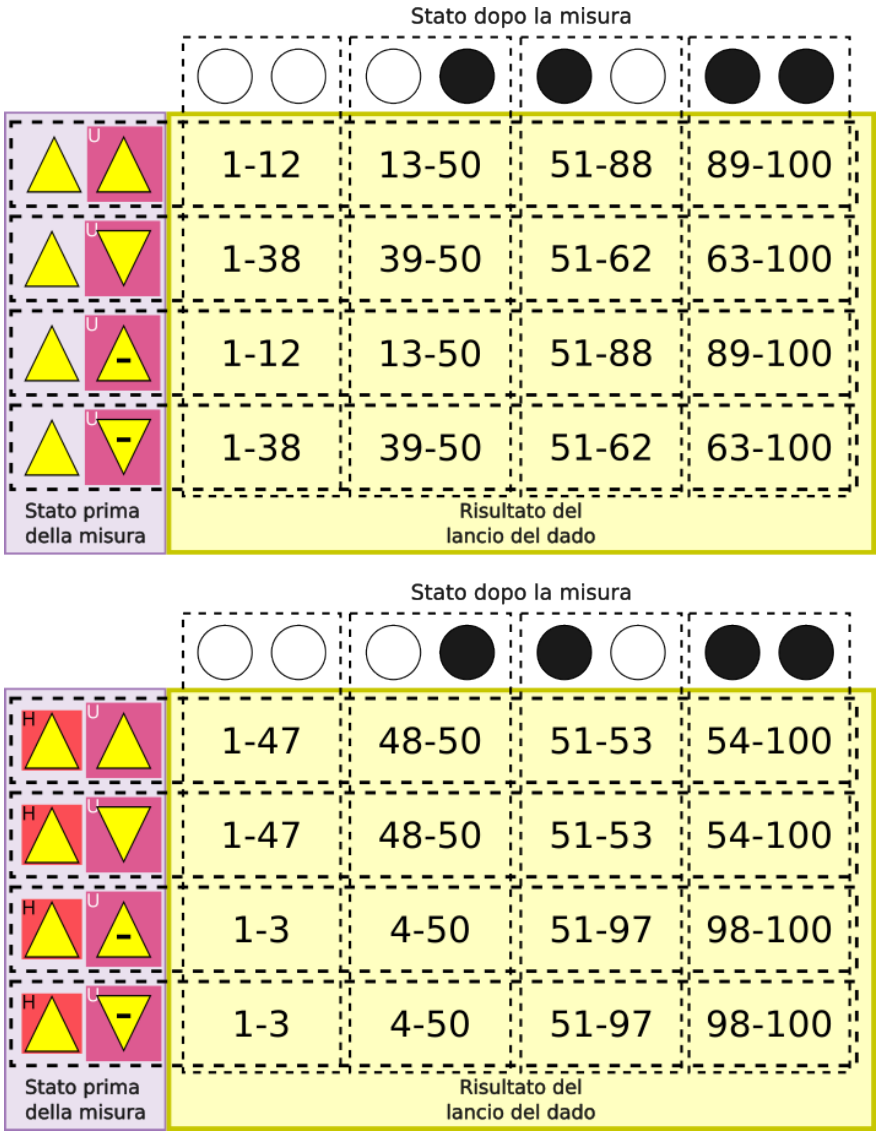


Figura 2.15: **Tabella di misura 4.** Durante una misura sarà necessario lanciare due dadi a dieci facce: uno per le decine e uno per le unità. Il risultato di questi due lanci sarà un numero compreso tra 1 e 100, e dunque un risultato percentuale.[5]

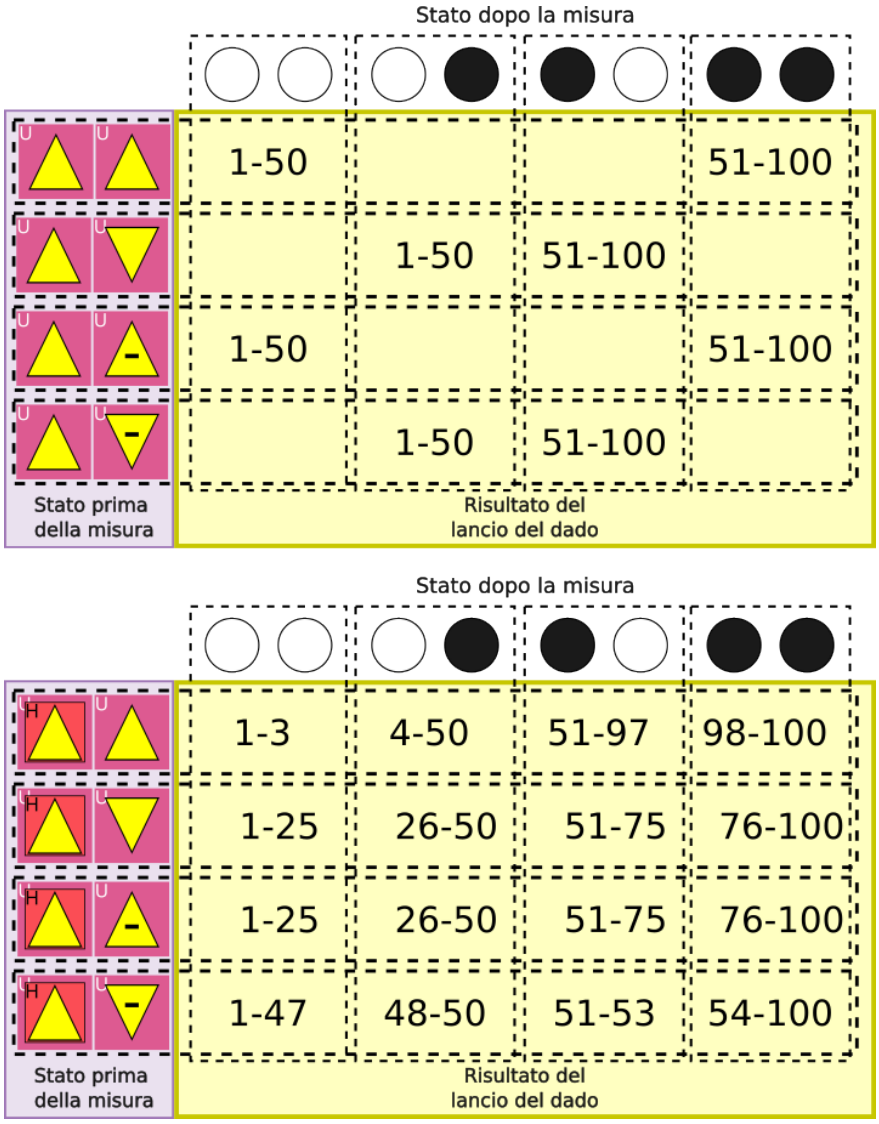


Figura 2.16: **Tabella di misura 5.** Durante una misura sarà necessario lanciare due dadi a dieci facce: uno per le decine e uno per le unità. Il risultato di questi due lanci sarà un numero compreso tra 1 e 100, e dunque un risultato percentuale.

Riepilogo delle fasi e delle azioni di gioco.

1. Fase di preparazione
   (a) Riempire tutta la griglia di gioco con stati validi.
   (b) Distribuire sei (6) carte per ciascun giocatore.
   (c) Stabilire l'ordine di gioco (lancio del dado).
   (d) Mulligan.
2. Fase delle operazioni
   - I giocatori effettuano, rispettando l'ordine di gioco precedentemente stabilito, un totale di cinque (5) turni di gioco alternati.
   - Struttura di ciascun turno di gioco:
     (a) pescare due (2) carte dal mazzo delle carte mossa;
     (b) giocare due (2) carte mossa dalla mano.
3. Fase di misura
   - Effettuare la procedura di misura della griglia di gioco come riportato nel riquadro in Sez. 2.3.3.
4. Fase di assegnazione punti
   - Per ciascun tris effettuato con il proprio simbolo di gioco (tessera bianca o nera), i giocatori ricevono un punto. Vince la partita il giocatore con più punti.

Figura 2.17: **Riepilogo delle fasi e delle azioni di gioco.**

MQ

La misura in meccanica quantistica. In meccanica quantistica, l'evoluzione unitaria dello stato è deterministica. Questo significa che usando le regole delle operazioni unitarie si può sapere esattamente in che stato si troverà il sistema alla fine.
Tuttavia, la misura non dà risultati deterministici ma solo delle probabilità. Infatti, in QTris il risultato di una misura è stabilito da un lancio di dadi.
Il metodo di calcolo delle probabilità che consente di associare a uno stato le probabilità di fornire certe osservazioni si chiama *regola di Born*. Esso non è particolarmente complicato, ma va un poco al di là dello scopo di questo manualetto di istruzioni. I giocatori interessati possono utilizzare l'espansione *QTris-Exp* e imparare a fare anche questi calcoli. In questo modo impareranno anche a creare nuove carte e nuovi stati per ampliare le possibilità di gioco in QTris, e perfino a simulare un buco nero.
Notate che la misura non è una operazione unitaria. Questo significa che non si può tornare indietro. Ma perché il lancio di dadi è una operazione irreversibilie? Mettiamo di eseguire la misura su una tessera bianconera che sia orientata verso destra. Sappiamo di avere una probabilità $1/2$ di ottenere una tessera tutta bianca o tutta nera. Ma anche se la tessera bianconera è orientata verso sinistra otteniamo le stesse probabilità. Mettiamo che la misura ci riveli una tessera bianca. Se volessimo tornare indietro, avremmo l'imbarazzo della scelta: dobbiamo tornare indietro alla tessera bianconera orientata verso destra o verso sinistra? Come distinguiamo una tessera nera che viene da una bianconera verso destra o sinistra? Non possiamo, quindi non possiamo tornare indietro con certezza.

2.4 Tattiche di gioco e esempi

2.4.1 Come usare la carta H

Abbiamo visto che le tessere bianconere danno una probabilità uniforme (cioè $1/2$) di ottenere una tessera bianca o una tessera nera quando vengono misurate, indipendentemente dal fatto che la tessera bianconera sia rivolta verso destra o verso sinistra. Questo significa che le due tessere bianconere siano uguali? Perché mai uno dovrebbe prendersi cura di usare la carta Z per cambiare il verso della tessera bianconera?

Se non ci fosse la carta H, le due orientazioni della tessera sarebbero equivalenti. Non ci sarebbe nulla nel gioco per cui abbia senso preferire l'una all'altra. Dopo un poco, i giocatori smetterebbero anche di prestare attenzione a come disporla, perché tanto la sua orientazione non fa alcuna differenza.

Tuttavia, la carta H rende il verso della tessera molto importante. Infatti, se il giocatore che gioca con le tessere bianche si trova di fronte una tessera bian-

conera orientata a destra, con la carta H la può trasformare in bianca! Quindi le sue probabilità di ottenere una tessera bianca in quella casella passano da $1/2$ a 1! Se invece si trova davanti una tessera bianconera orientata a sinistra, può utilizzare prima la carta Z per trasformarla in tessera bianconera orientata a destra, e poi successivamente con H ottenere la desiderata tessera bianca. Il giocatore tessere nere potrà ovviamente seguire una tattica simile.

MQ

E allora, cosa sono i gattini di Schrödinger? Abbiamo visto che i gattini di Schrödinger hanno la proprietà di non avere un colore ben determinato finché non si effettua la misura, dopodiché questo colore viene stabilito con una probabilità di $1/2$. Ma allora, la storia è tutta qua? Il gattino di Schrödinger è semplicemente quella che i matematici chiamano una distribuzione di probabilità? Se fosse così, abbiamo visto che non ci sarebbe alcuna differenza tra il gattino bianconero a destra e quello a sinistra. La carta Z non servirebbe a nulla. C'è un unico gattino bianconero che ci dà queste probabilità. Tuttavia, esiste una operazione unitaria, l'operazione H, che porta *con certezza* la tessera bianconera orientata a destra nella tessera bianca, e la tessera bianconera a sinistra in quella nera. Esiste dunque una operazione che con certezza ci porta a quello che desideriamo e questo fa una grande differenza! I gattini di Schrödinger dunque hanno questa doppia natura: se uno li osserva, sono bianchi o neri al 50%, ma c'è un modo di farli diventare sicuramente bianchi o sicuramente neri! I fisici quantistici dicono che questo tipo di proprietà è quella di una *sovrapposizione coerente*, ma sono solo parole difficili per dire la stessa cosa che abbiamo spiegato in termini delle operazioni H e Z.

2.4.2 Come usare la carta C_X.

La carta C_X è estremamente potente e versatile. La tabella che riporta l'effetto che la C_X ha sugli stati del gioco è riportata in Fig. 2.7. In questa tabella possiamo notare che la C_X può essere utilizzata come una semplice carta X sugli stati formati unicamente da tessere bianche o nere. Invece, quando utilizziamo la C_X su una tessera bianconera ed una tessera di un solo colore, possiamo produrre stati entangled!

In Fig. 2.18 è riportato un esempio di gioco della carta C_X che ci fa comprendere a pieno le sue potenzialità. Immaginiamo di stare giocando una partita di QTris, e che la griglia di gioco sia quella di sinistra in Fig. 2.18. Immaginiamo anche che sia il nostro turno, che la nostra mano sia formata da due carte C_X, e che sia l'ultimo turno di gioco (dopo il nostro turno passeremo, quindi, alla fase di assegnazione dei punti). Decidiamo di giocare, come prima carta mossa del nostro turno, la carta C_X sulle caselle 1 e 6. A questo punto, lo stato della griglia sarà quello rappresentato al centro della Fig. 2.18. Abbiamo quindi creato uno stato entangled. Abbiamo ancora una carta C_X a disposizione

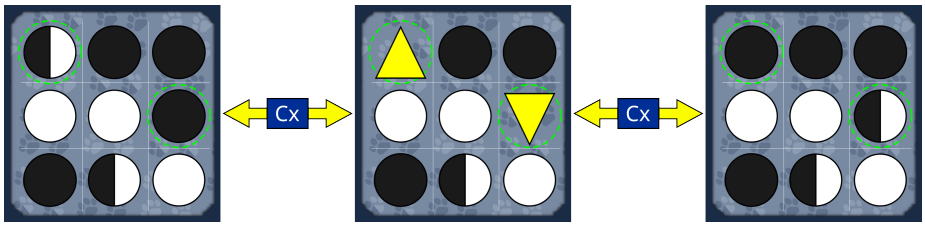


Figura 2.18: **Esempio di gioco della carta C_X.**

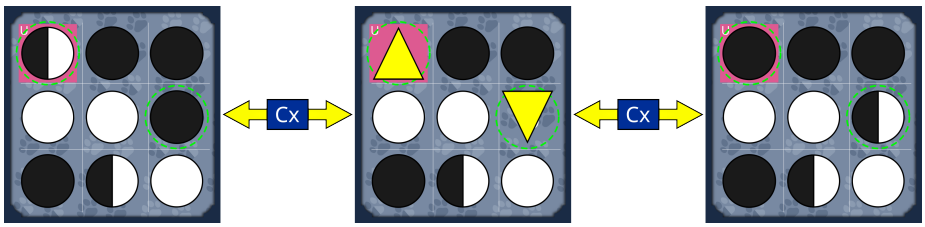


Figura 2.19: **Esempio di gioco della carta C_X su stati entangled decorati da U.**

da dover giocare. Possiamo decidere di riapplicarla nuovamente sulle stesse caselle (la 1 e la 6). A questo punto, guardando la tabella in Fig. 2.7 ci accorgiamo che dobbiamo posizionare una tessera bianconera ed una nera sulle due caselle. Abbiamo due possibili scelte: posizionare nuovamente la tessera bianconera sulla casella 1 e la tessera nera sulla casella 6, o viceversa. Chiaramente, posizionare la tessera nera sulla casella 1 è la scelta più conveniente, poichè ci consente di chiudere la fase di operazioni con un tris a nostro vantaggio!

Dunque, la carta C_X ci consente sia di ritornare allo stato precedente della griglia, sia di poter invertire la posizione delle tessere su cui ha agito.

Una cosa importante da notare è che la carta C_X, sebbene ci consenta di scegliere dove apporre le tessere quando la utilizziamo su stati entangled, non ci consente di muovere la tessera rosa. Dunque, nell'esempio di gioco in Fig. 2.19, decidendo di utilizzare la C_X in modo da ottenere lo stato della griglia sulla destra, per ottenere un tris di tessere nere dovremo anche utilizzare una carta mossa U sulla tessera della casella 1 per rimuovere la tessera rosa.

MQ

Gli stati entangled.
Gli stati entangled sono stati di più caselle che non possono essere descritti completamente tramite stati di singola casella. Ovvero, fuori dal QTris, conoscere lo stato dei singoli sottosistemi non ci permetterà di conoscere lo stato del sistema composito di cui essi fanno parte. In un certo senso, di un sistema composito in cui c'è entanglement tra i suoi sottosistemi conosciamo meglio lo stato totale, che lo stato dei singoli sottosistemi che lo compongono.
Nel gergo dei fisici quantistici diremmo che l'entanglement è il fenomeno per il quale lo stato globale di un sistema composito non può essere scritto come prodotto di stati di sottosistemi individuali.
Come abbiamo potuto notare, la C_X ci consente, in alcuni casi, di *entanglare* due stati che precedentemente non erano entangled, e viceversa. Ad esempio, abbiamo visto che lo stato tessera bianconera orientata a destra e lo stato tessera nera dopo aver usato la C_X sono diventati un unico stato entangled. Dunque gli stati sono diventati entangled interagendo fra loro per via dell'applicazione della carta C_X. Per generare stati entangled, infatti, serve un'interazione tra i sottosistemi del nostro sistema composito!
Diamo un'occhiata alla tabella di misura in Fig. 2.13. In particolare, prendiamo in considerazione il primo stato: quello tessera nera alta-triangolo alto. Dopo averlo misurato, esso rivelerà con uguale probabilità lo stato tessera bianca-tessera bianca, o lo stato tessera nera-tessera nera. Dunque, i colori delle due tessere sono evidentemente correlati fra loro.
Nello scorso esempio, sembra quasi che la misura della prima tessera abbia istantaneamente modificato lo stato della seconda tessera. In realtà, questo non accade mai. Piú semplicemente, il conoscere il risultato della prima misura, ci fa avere informazioni sul possibile stato della seconda.
Quindi, nell'esempio precedente, la misura del colore di una tessera ci ha dato informazioni sullo stato dell'altra. Non sempre, però, siamo così fortunati. Alcuni stati in Fig. 2.13, ad esempio, possono diventare con la stessa probabilità, a valle della misura della prima tessera, una qualsiasi combinazione di due tessere bianche o nere. In questo caso, come mai parliamo ancora di entanglement? Negli stati entangled non sono sempre in correlazione le stesse proprietà (come il colore delle tessere) dei sistemi. Infatti, per gli stati entangled del tipo tessera bianconera (a destra o sinistra)-triangolo (alto o basso), sono in correlazione, rispettivamente: l'orientamento della prima tessera (quella bianconera) e il colore della seconda. Dulcis in fundo, gli stati entangled sono anche loro sovrapposizioni coerenti, ovvero stati puri. Quindi, come ci dice anche la tabella in Fig. 2.8, possiamo utilizzare operazioni unitarie (carte mossa) che ci portano con certezza allo stato entangled che desideriamo!

2.5 Altri giochi in cui QTris mostra la meccanica quantistica

Come abbiamo detto sopra, non vi è nulla nella meccanica quantistica che non possa essere fatto in QTris. Vi sono un numero pressoché infinito di giochi addizionali che si possono giocare su QTris che hanno un corrispettivo in meccanica quantistica, e di esperimenti quantistici che si possono mostrare su QTris. In questa sezione esploreremo alcune di queste questioni!

Una cosa che ci si chiede in meccanica quantistica è: cosa accade a uno stato quantistico dopo una misura? Beh, come abbiamo visto, finora misurare significava osservare se una tessera fosse bianca o nera. Abbiamo visto che quando si misura questa cosa, la risposta sarà del tipo: bianca o nera con una certa probabilità (data dal lancio dei dadi). Cosa succede dopo? Bene, se nulla altro interviene, la tessera resta bianca o nera! Questa sembra essere una proprietà molto naturale! I fisici quantistici la chiamano collasso.

MQ

Il collasso. I fisici quantistici amano essere drammatici. Nel caso dei gatti, amano parlare di vita/morte. Per stati quantistici più in generale, amano parlare di collasso. Cosa si intende? Prendiamo il caso di uno stato quantistico, per esempio la zampetta bianconera (rosa, verso destra). Sappiamo che la probabilità di trovare la tessera bianca è $1/4$. A questo punto la zampetta è effettivamente bianca! Se ora mi chiedessi: «con che probabilità osserverò una tessera bianca d'ora in poi?». Bene, se nulla succede nel frattempo (cioè se nessuna altra operazione interviene), la tessera sarà sicuramente bianca! Questo è solo un modo di dire che le proprietà fisiche sono stabili. Lo stato quindi deve cambiare da tessera bianconera (rosa, verso destra) a tessera bianca. Tutto qua: forse parlare di *collasso* è un po' melodrammatico.

A questo punto ci si chiede: ma di una tessera posso solo osservare il colore? O ci sono altre misure che posso fare? Per esempio, la massa, l'energia, la *pelosaggine*! In particolare, in meccanica quantistica vi sono delle proprietà un po' strane: come quella di una tessera bianconera che può essere orientata verso destra o verso sinistra (ricorda che per le zampette di colore unico l'orientazione non conta). Se lo stato di una zampetta è bianca, possiamo osservarne l'orientazione? Come no! Se cerchiamo di osservare l'orientazione di una zampetta partendo da una zampetta bianca, potremmo trovarla verso l'alto o verso il basso. Di nuovo, con qualche probabilità. Ebbene, le nostre tavole di probabilità funzionano ugualmente! Per esempio, se una zampetta è bianca ma osserviamo la proprietà di essere bianconera (alta o bassa), queste si manifesteranno con una probabilità uguale a quella della tabella di misura in Fig. 2.12! Bisogna solo invertire stato prima della misura con stato dopo la misura!

MQ

Misure in 'basi diverse'. Ecco una domanda interessante: esiste una proprietà fisica corrispondente a essere zampetta bianconera (alta)? E un'altra proprietà complementare corrispondente all'essere zampetta bianconera (bassa)? Due proprietà sono esclusive se quando una è certa (cioè ha probabilità 1) l'altra è impossibile (cioè ha probabilità zero). Orbene, se queste proprietà esistono fisicamente significa che dobbiamo poter disegnare un esperimento che le rileva! Ricordiamoci che la fisica è una scienza sperimentale, quindi è interessata in ultima analisi alle cose che uno può osservare! Per fare questo esperimento bisognerebbe poter costruire un apparato che, quando lo stato è zampetta bianconera (alta) ci dà come risposta "zampetta bianconera (alta)" con una probabilità 1 e così via.
Ecco come costruire questo apparato. Costruiamo semplicemente l'apparato che prima effettua l'operazione H, e poi misura il colore! Vediamo come funziona. Se lo stato è zampetta bianconera (alta), dopo H diventa zampetta bianca, e la misura di colore ci darà bianco con probabilità 1 (viceversa per basso<->nero). A questo punto basta cambiare sulle lucette dell'apparato la targhetta da bianco a "bianconero (alto)" e da nero a "bianconero (basso)" e il gioco è fatto.

Abbiamo imparato qualcosa di molto interessante. Possiamo misurare la proprietà 'colore' oppure la proprietà 'orientazione'. Un gioco interessante potrebbe essere questo. Prepariamo una tessera di colore bianco, e poi facciamo una serie di misure in sequenza. Per esempio misuriamo prima l'orientazione, poi il colore, e poi di nuovo l'orientazione. Che succederà? Orbene, con probabilità $1/2$ la tessera sarà orientata verso l'alto, e con la stessa probabilità verso il basso. Ma, visto che ha una orientazione, ora sappiamo che deve essere bianconera! Infatti, non vi è alcuna orientazione per le zampette bianche (o nere), solo per quelle bianconere. Benissimo, adesso abbiamo una zampetta bianconera orientata verso l'alto. Se adesso misuriamo il colore, sappiamo di poter ottenere con la stessa probabilità $1/2$ una zampetta bianca o nera (senza alcuna orientazione particolare). Sappiamo bene adesso cosa possa succedere se misuriamo di nuovo l'orientazione: otterremo una zampetta (bianconera) orientata verso l'alto o verso il basso con una probabilità $1/2$. Questo semplice gioco risulta essere uno degli esperimenti fondamentali della meccanica quantistica, come vedremo nel foglietto di sotto!

MQ

L'esperimento di Stern e Gerlach. Nel 1922, i fisici Stern e Gerlach hanno condotto un esperimento che ha sottolineato la necessità di abbandonare i principi della fisica classica per comprendere alcuni fenomeni fisici particolari. L'obiettivo dell'esperimento era comprendere come si comporta un elettrone all'interno di un campo magnetico.
L'esperimento utilizza degli atomi di argento, che possiamo immaginare comportarsi come piccoli magneti quando vengono sottoposti ad un campo magnetico.
L'esperimento inizia riscaldando gli atomi di argento in un forno. Gli atomi, agitati termicamente, riescono ad uscire dal forno attraverso un piccolo foro, formando un fascio, e vengono diretti verso un campo magnetico non uniforme utilizzando un dispositivo chiamato collimatore. Dopo aver attraversato il campo magnetico, gli atomi di argento colpiscono uno schermo in grado di registrarne i punti di impatto.
In un contesto classico, ci aspetteremmo il fascio di atomi sostanzialmente indeflesso, dunque tanti punti di impatto concentrati all'incirca al centro dello schermo. L'esperimento mostra, invece, che gli atomi di argento vengono deflessi verso l'alto e verso il basso, colpendo solo due regioni piuttosto ristrette dello schermo.
L'apparato di Stern e Gerlach misura una proprietà fisica dell'elettrone e di altre particelle, chiamata *spin*, lungo una direzione. Come abbiamo visto, lo spin degli atomi in questo esperimento ha assunto solo due valori discreti, proprio come accade per il colore delle zampette in QTris.
Supponiamo di utilizzare un apparato di Stern e Gerlach lungo una direzione z. Supponiamo, inoltre, di selezionare tutti gli atomi deflessi in alto lungo z. Facendo passare questi atomi in un altro apparato di Stern e Gerlach lungo z, notiamo che gli atomi saranno sempre deflessi lungo l'alto. Dunque lo spin lungo z è una proprietà fisica stabile. Immaginiamo ora di far passare questi atomi attraverso un apparato di Stern e Gerlach lungo una direzione x perpendicolare a z. Notiamo che gli atomi vengono deflessi verso destra o sinistra. Selezionando nuovamente solo uno di questi due rami e facendo passare questi atomi in un altro apparato di Stern e Gerlach lungo z, notiamo nuovamente che gli atomi vengono deflessi verso l'alto e verso il basso. Questo ci dice che lo spin lungo z e lo spin lungo x sono proprietà fisiche incompatibili, proprio come il colore e l'orientamento delle zampette in QTris!

L'esperimento di Stern e Gerlach descritto sopra è qualcosa che si può giocare su una singola casella di QTris, come avrete capito. I fisici, prima di diventare fisici quantistici, non ci si raccapezzavano perché per essi sembrava inconcepibile che non si potessero stabilire contemporaneamente due proprie-

tà degli atomi di argento dell'esperimento. Finché non giunse Heisenberg e stabilì un principio secondo cui questa indeterminazione è proprio alla base della meccanica quantistica. Da allora, i fisici sono diventati fisici quantistici.

MQ

Il principio di indeterminazione di Heisenberg. Alcuni di voi interessati alla meccanica quantistica si saranno imbattuti in questa espressione piuttosto misteriosa. Cosa significa? Abbiamo visto che le zampette dei nostri gattini quantistici hanno due proprietà: il colore e l'orientazione. Ovviamente, per un gattino normale (i fisici li chiamano gattini *classici*) queste proprietà sono *compatibili.* Con questo si intende che si può affermare con certezza, guardando la zampetta di un gattino, di che colore sia, e dove sia orientata. Orbene, le zampette dei nostri gattini quantistici non consentono una cosa del genere! Infatti, se la zampetta ha un colore ben definito, per esempio nero, la sua orientazione sarà al 50% alta e al 50% bassa. In altre parole, non abbiamo la più pallida idea di come possa essere orientata. Viceversa, se verifichiamo che una zampetta sia orientata verso l'alto, questa non avrà un colore definito, ma solo il 50% di probabilità di essere bianca o nera. I fisici quantistici dicono che queste due proprietà, colore e orientazione, sono *incompatibili*. Di conseguenza, se una proprietà è determinata, l'altra è indeterminata. Ecco a voi il principio di indeterminazione.

2.6 Regolamento avanzato

2.6.1 Tutti contro Eve

In questa variante del gioco, ci sono tre giocatori: Alice, Bob e Eve. Alice e Bob questa volta cooperano e cercano di fare più tris possibili. Eve, invece, cerca di impedirglielo.

Il gioco si compone di più partite e termina non appena una delle due parti (Alice-Bob o Eve) arriva a tre punti.

In ogni partita, ciascun giocatore comincia la partita con sei (6) carte a testa. Alice e Bob possono decidere di effettuare un mulligan (cambiare un certo numero di carte dalla propria mano), ma in questa variante del gioco pescheranno una carta in meno rispetto al numero di carte che hanno scartato. La partita dura dieci (10) turni: cinque (5) per ciascun giocatore. A differenza della modalità standard di QTris, in questa variante i giocatori Alice e Bob possono giocare una sola carta per turno fra quelle di cui sono in possesso. Eve, al contrario, ne gioca due in ogni suo turno. Una sola volta in tutta la partita, Eve può decidere di effettuare la misura di uno stato presente sulla griglia nella base di gioco che preferisce (lo stato può anche essere entangled). Al termine della partita, se vi sono più tris, l'alleanza di Alice e Bob prende tanti punti quanti i tris realizzati meno uno. Se, al termine della partita, ci sono meno di un (1) tris a favore di Alice e Bob, Eve riceverà un (1) punto e Alice e Bob ne riceveranno zero (0).

Riepilogo delle fasi di gioco [Variante Eve]

1. Fase di preparazione
   (a) Riempire tutta la griglia di gioco con stati validi.
   (b) Distribuire sei (6) carte per ciascun giocatore (Alice, Bob e Eve).
   (c) Stabilire l'ordine di gioco (lancio del dado). L'ordine di gioco deve essere del tipo Alice-Eve-Bob.
   (d) Mulligan (in caso di mulligan ciascun giocatore pesca $n - 1$ carte, dove n è il numero di carte scartate).
2. Fase delle operazioni
   - I giocatori effettuano, rispettando l'ordine di gioco precedentemente stabilito, un totale di cinque (5) turni di gioco alternati.
     (a) Struttura di ciascun turno di gioco di Alice e Bob:
        i. Pescare una (1) carta dal mazzo delle carte mossa.
        ii. Giocare una carta mossa dalla mano.
     (b) Struttura di ciascun turno di gioco di Eve:
        i. Pescare due (2) carte dal mazzo delle carte mossa.
        ii. Giocare due carte mossa dalla mano, oppure, se non lo si è già fatto nella partita corrente, scartare due carte dalla mano ed effettuare la misura di uno stato sulla griglia nella base di gioco che si preferisce.
3. Fase di misura
   - Effettuare la procedura di misura della griglia di gioco come riportato nel riquadro in Sez. 2.3.3.
4. Fase di assegnazione punti
   - Alice e Bob ricevono tanti punti quanti sono i tris che hanno fatto meno uno. Esempio: Alice e Bob hanno chiuso la partita con tre (3) tris a loro vantaggio. Riceveranno, in questo caso, due (2) punti.
   - Eve riceve un (1) punto solo nel caso in cui Alice e Bob hanno concluso la partita con meno di due (2) tris.

2.7 E ora?

Congratulazioni, siete arrivati alla fine del regolamento di QTris. Ora potete giocare e divertirvi. Coloro che avranno capito le regole, giocato e letto i foglietti di meccanica quantistica avranno anche capito un bel po' di come funziona questa teoria fisica. Coloro che avranno solo giocato, anche essi avranno capito un bel po' di meccanica quantistica, anche senza rendersene conto. Ma se leggeranno qualche libro divulgativo di fisica, come l'ottimo libro di Terry Rudolph[6], si troveranno molto bene. Infine, coloro che avranno letto e studiato il capitolo di meccanica quantistica vera e propria potranno dire di conoscere davvero le prime cose di meccanica quantistica, a un livello che gli sarà utile perfino per eventuali studi universitari.

MQ

QTris e la meccanica quantistica. Siamo giunti alla fine di questo viaggio (per ora). Abbiamo visto molti esempi ed esperimenti quantistici che possono essere giocati su QTris. Inoltre, tutte le partite di QTris corrispondono a esperimenti di meccanica quantistica che possiamo fare in laboratorio! A questo punto sorge una domanda: ma davvero *tutto* quello che si può fare in meccanica quantistica ha un corrispettivo in QTris? La risposta è, senza dubbio, sì! Tuttavia, la ricchezza della meccanica quantistica richiede molti più stati e carte per rappresentare altri stati in maniera efficiente, e nuove tavole di probabilità. La cosa meravigliosa è che chiunque può imparare a creare nuove tessere, carte e tavole di probabilità per effettuare nuovi esperimenti quantistici. Per imparare a fare tutto questo il giocatore interessato può fare due cose: frequentare un corso di meccanica quantistica dell'informazione, oppure procurarsi la scatola di *QTris-Exp*! Alla fine di quei giochi, ne saprà quanto molti fisici quantistici!

Cosa succede ora? A parte divertirsi col QTris e diventare sempre più familiari con le sue regole e quindi con la meccanica quantistica, che altri giochi si possono fare? Questa teoria è una fucina di nuovi giochi dalle possibilità nuove e inaspettate. Per esempio, si può giocare a teletrasportare dei qubits - questa è una cosa che si fa per davvero in laboratorio - o usare l'entanglement per vincere a una serie di scommesse contro avversari che non posseggono stati entangled. In certe varianti, si può anche cercare di fuggire di prigione. Se non lo sapete, questo è perché Alice e Bob erano finiti in prigione per aver svaligiato una banca impenetrabile, nella quale erano penetrati sfruttando l'effetto tunnel della meccanica quantistica! Un altro gioco consiste nello sfuggire da un buco nero, o nel giocare alla battaglia navale quantistica, dove le navi si possono trovare in stati analoghi a quelli delle zampette bianconere, e dunque la logica per trovarle e colpirle è molto più interessante!

Come si può giocare a tutto questo? Usando le regole di base di QTris, più

[6] Terry Rudolph, *Quanti*, Adelphi 2020.

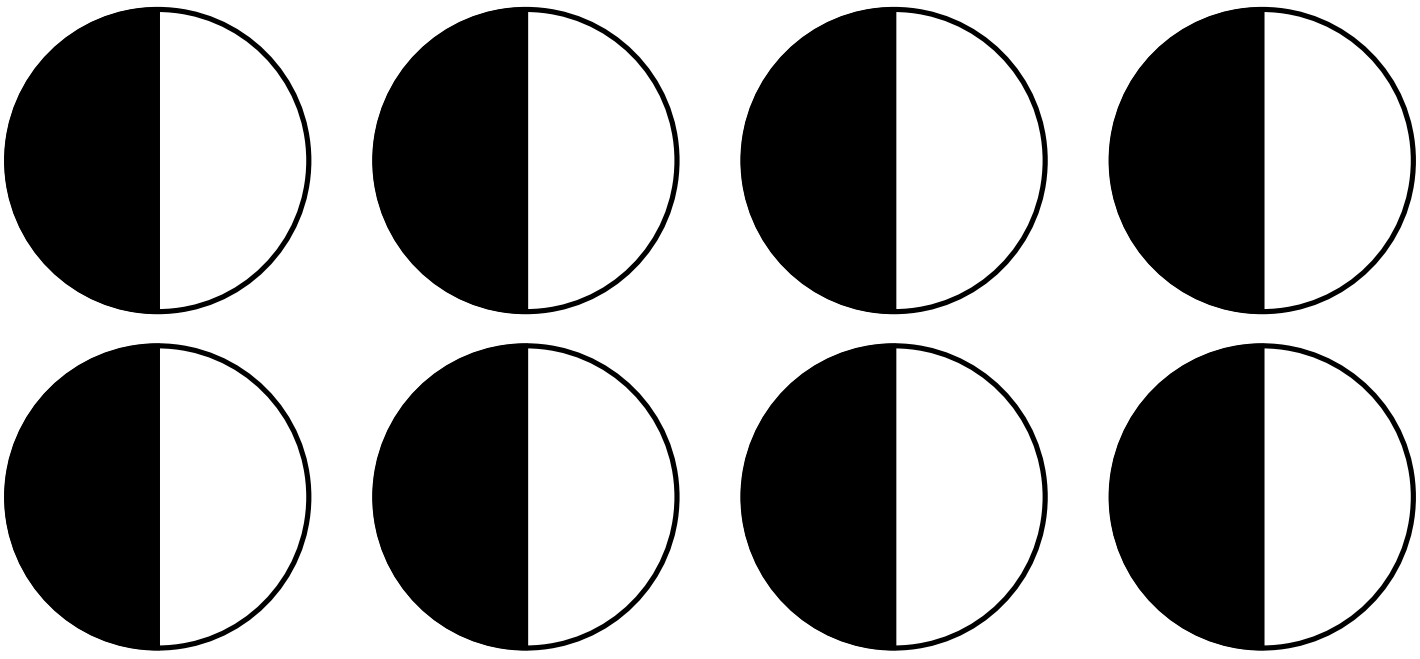
quelle della sua espansione *QTris-Exp*, con le sue nuove carte e le sue nuove tessere quantistiche. Non è escluso che con *QTris-Exp* si possano anche dimostrare nuovi algoritmi di informazione quantistica e trovare nuovi risultati scientifici!

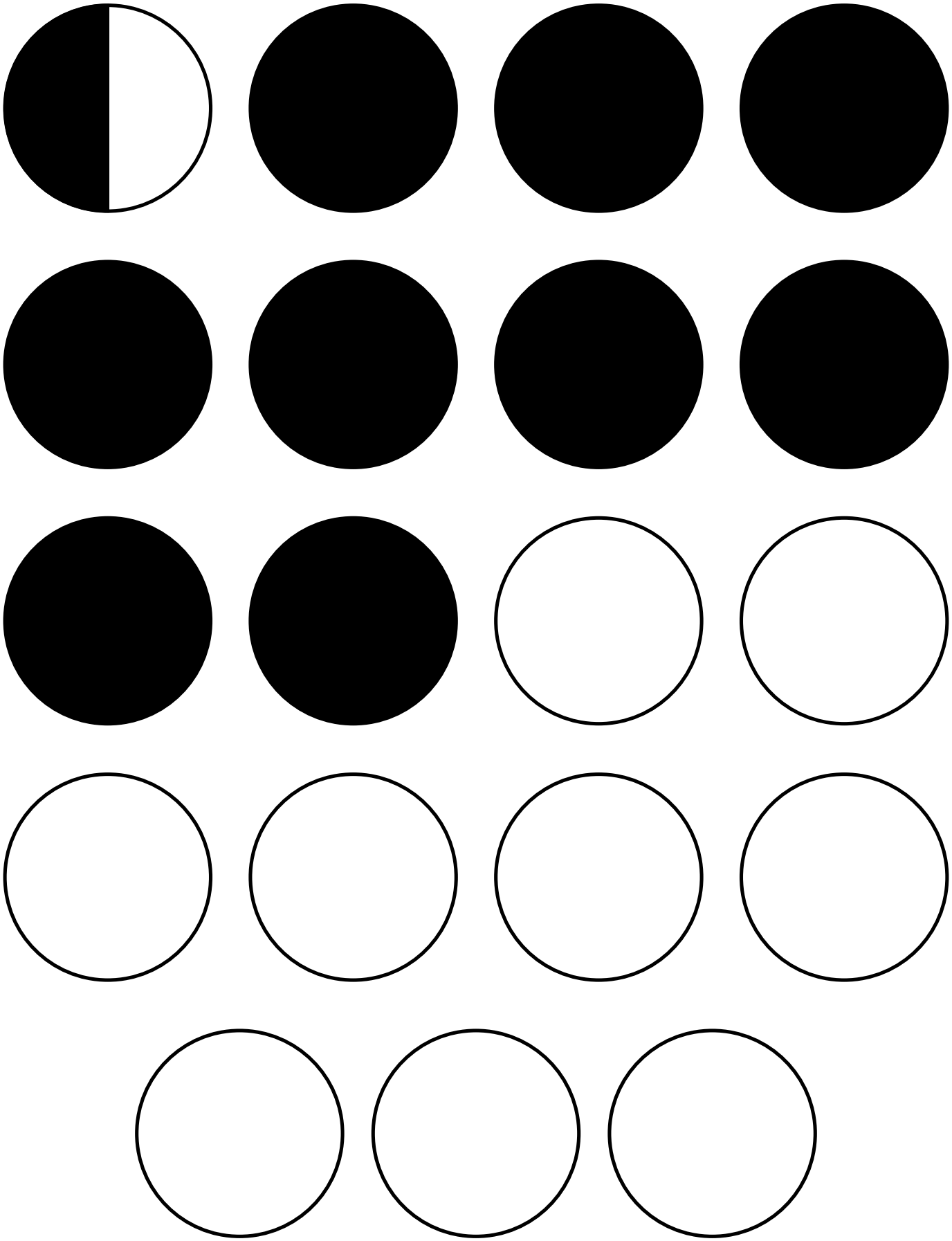
Chi abbia giocato a tutto, letto e compreso tutti i foglietti di mq, potrebbe avere voglia di approfondire la propria conoscenza di mq. I capitoli che seguono dànno una introduzione rigorosa e precisa della mq, nella quale il lettore riconoscerà che giocare a QTris non è altro che fare calcoli quantistici. Per coloro che abbiano bisogno di rinfrescare alcune nozioni di matematica, il prossimo capitolo offrirà consolazione. Coloro che non ne hanno bisogno possono saltare direttamente al capitolo di meccanica quantistica.

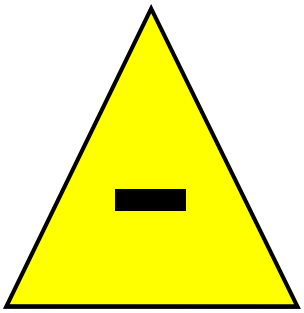
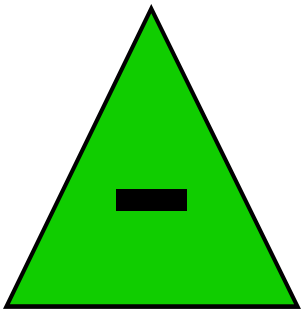
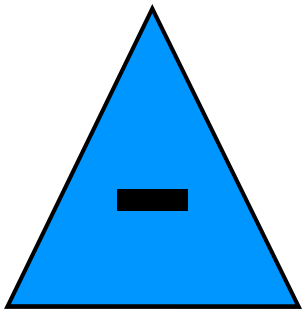
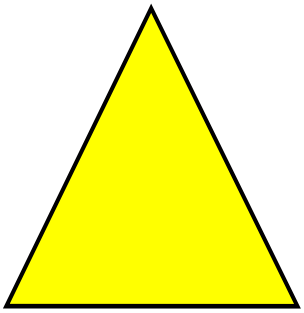
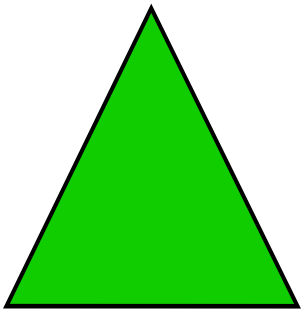
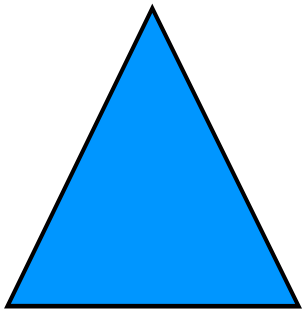
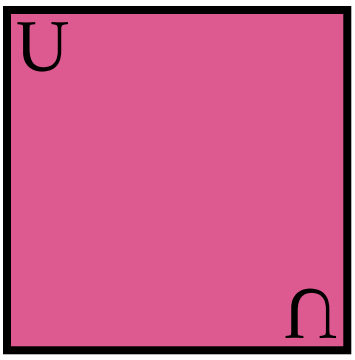
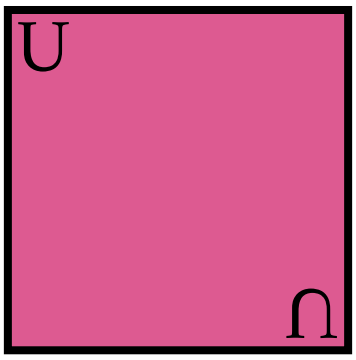
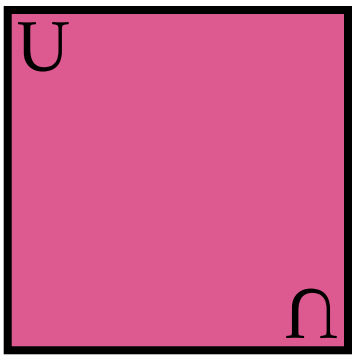
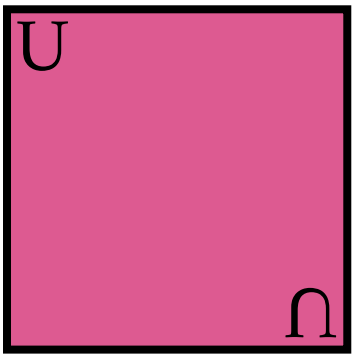
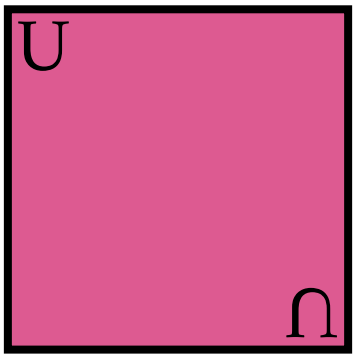
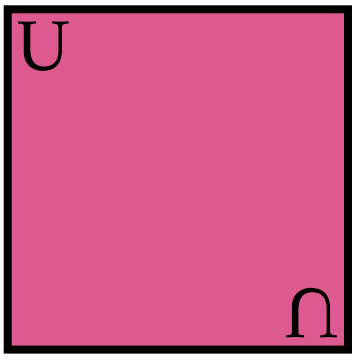
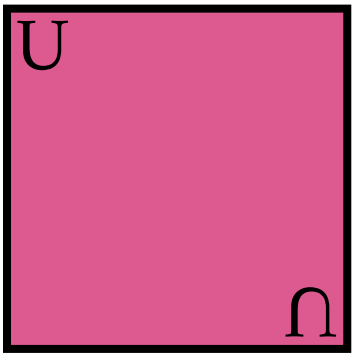
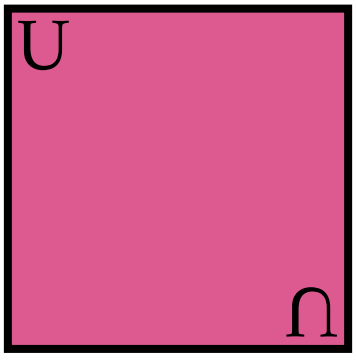
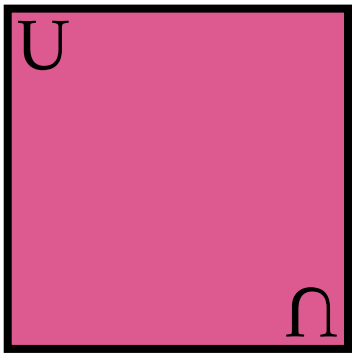
MQ

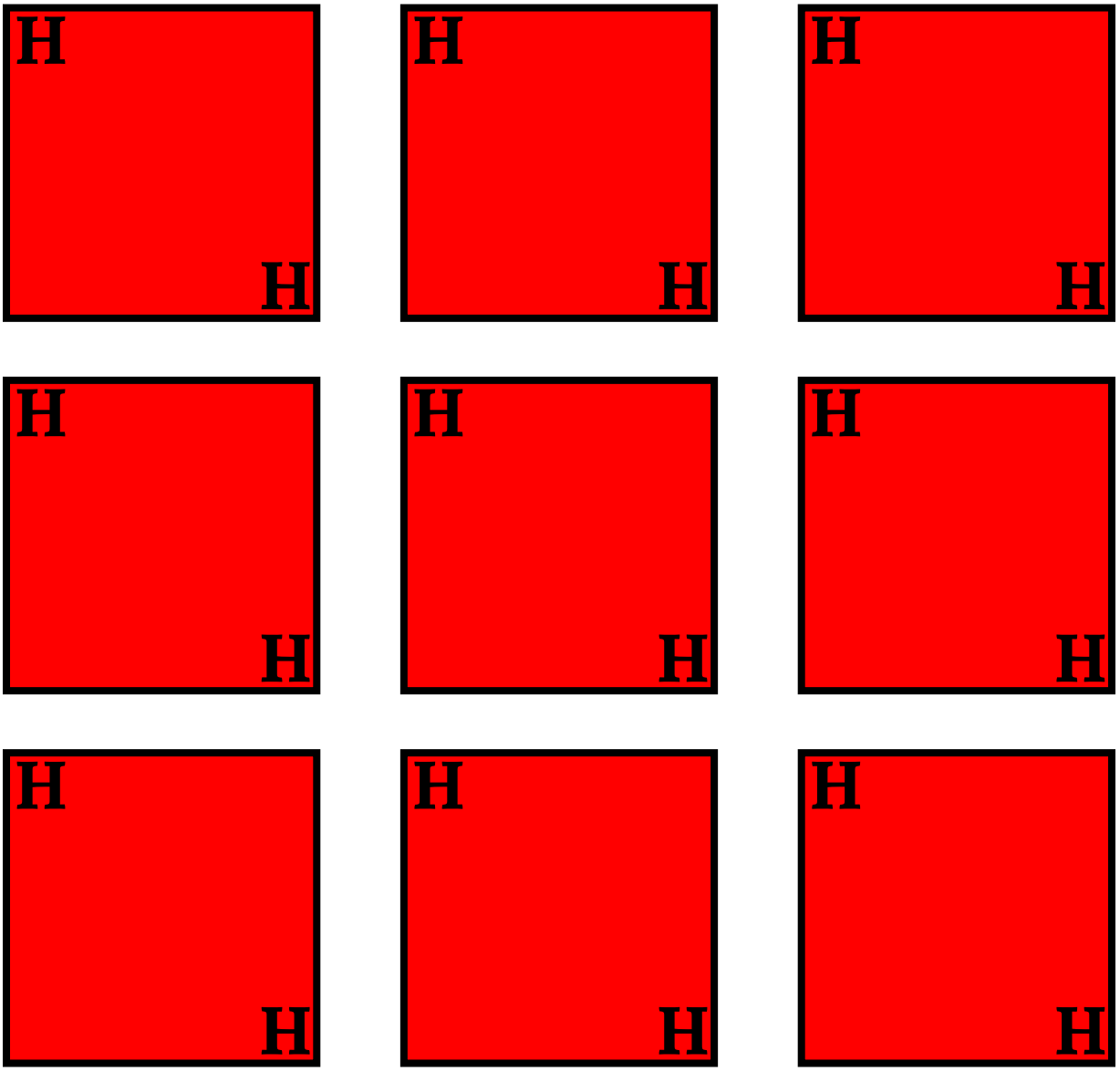
Le operazioni quantistiche. In meccanica quantistica, gli stati di un sistema possono cambiare col tempo. Tale cambiamento viene detto evoluzione ed è di due tipi che vengono chiamati *operazioni unitarie* e *operazioni non unitarie* a seconda delle leggi che le descrivono. Le carte mossa in QTris descrivono esattamente le leggi delle operazioni unitarie su un sistema quantistico di nove qubits.

1	2	3
4	5	6
7	8	9





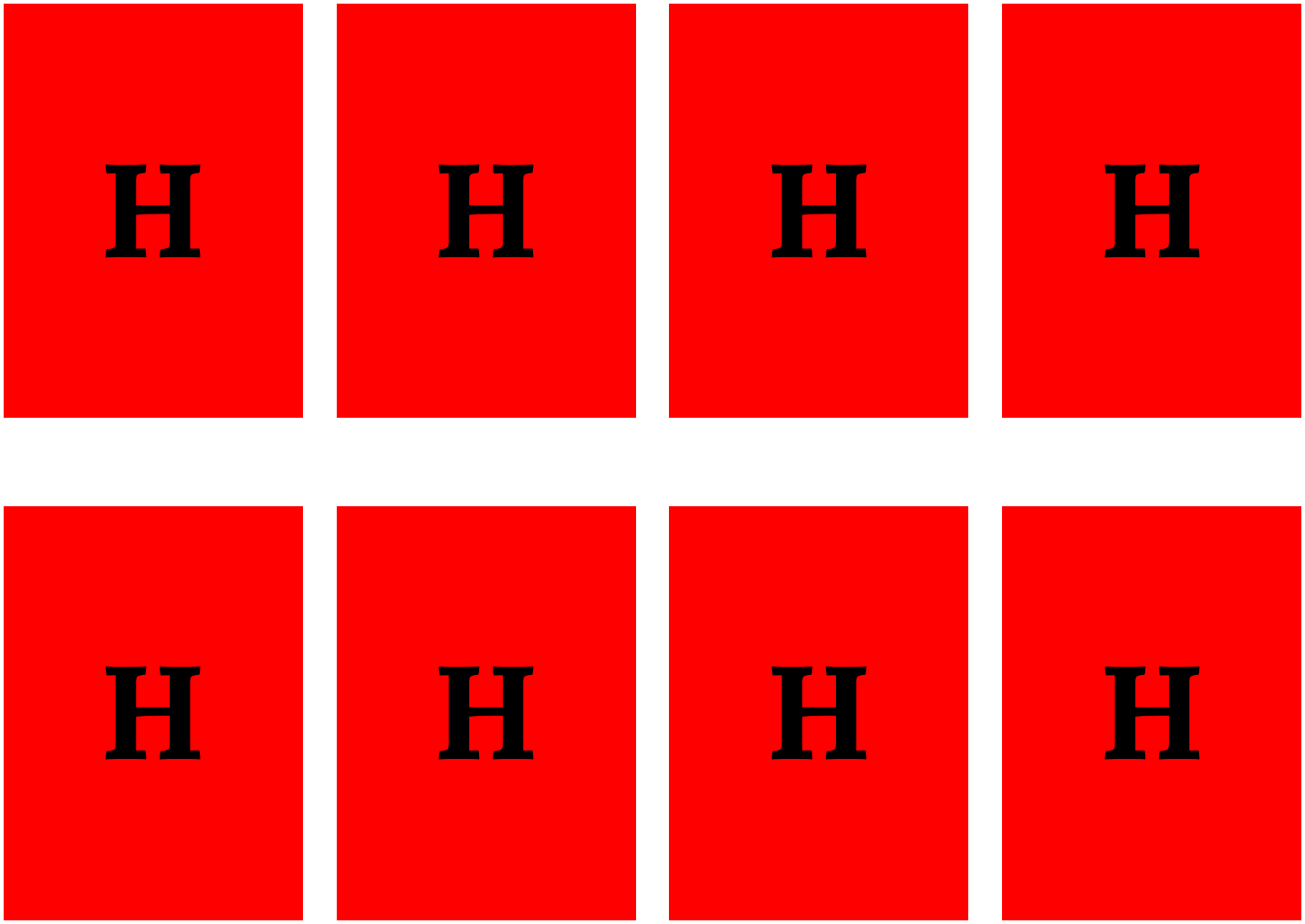







U
∩

U
∩

U
∩

U
∩

U
∩

U
∩

U
∩

U
∩

U
∩


H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H
H

I	I	I	I
I	I	X	X
X	X	X	X
X	X	X	X

X	X	Y	Y
Y	Y	Y	Y
Z	Z	Z	Z
Z	Z	Z	Z

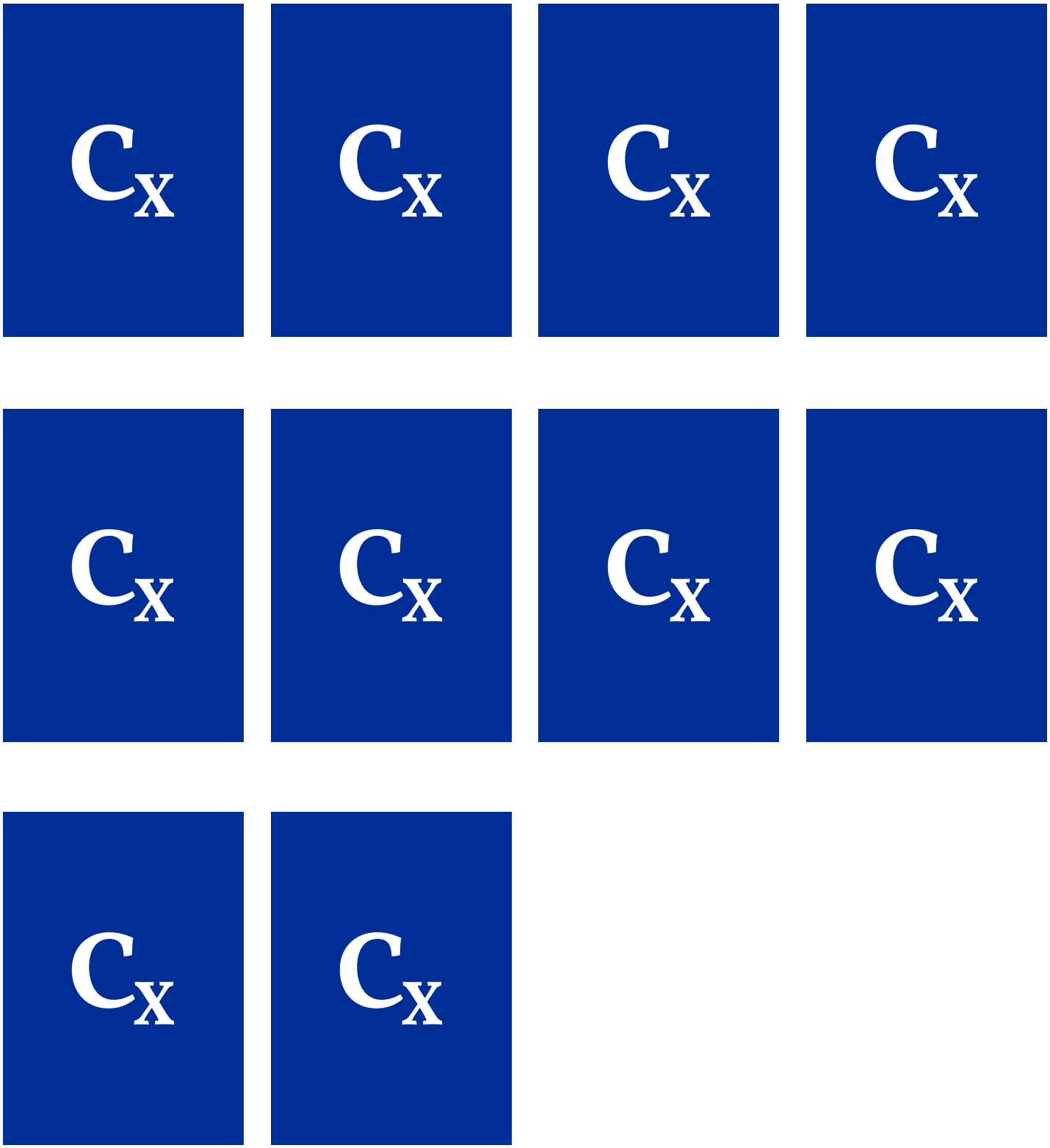
Z	Z	Z	Z
Z	Z	H	H
H	H	H	H
H	H	H	H


H
H
H
H
H
H
H
H

U U U U

U U U U

U U


C_X
C_X
C_X
C_X
C_X
C_X
C_X
C_X
C_X
C_X